RHEINMETALL

Waffen-technisches Taschen-buch

3., überarbeitete Auflage 1977

Rheinmetall GmbH, Postfach 6609, 4000 Düsseldorf

Entwurf und Gestaltung riw-Rheinmetall Industriewerbung GmbH, Düsseldorf.

Gesamtherstellung Brönners Druckerei Breidenstein KG, Frankfurt a. M.

RHEINMETALL

Waffen-technisches Taschen-buch

Autoren (verfaßte Kapitel oder Abschnitte) und Mitarbeiter

G. Backstein (13), P. Bettermann (14), B. Bisping, D. Böder (8.1.6, 8.1.7, 8.1.8, 10), Dr. S. v. Boutteville (9), H. Dechow, A. Fabry, S. Fischer, F. Flanhardt (7), E. Genter, Dr. R. Germershausen (1, 2, 12), H. Großschopf, K. Harbrecht (7), H.-D. Harnau (13), F. Horn (8, 10), J. Hornfeck, H. Kantner, D. Karius, Dr. E. Kokott (6), W. Kuppe (†) (6), Dr. K.-F. Leisinger, F. Mayer (14), Dr. E. Melchior (2, 3, 15), M. Moll, J. Prochnow (11.5), H. Renner (†), H. Reuschel (3, 4, 5), R. Romer (11), W. Röttges, H.-J. Rübsam, E. Schaub, H.-J. Schiewer (5), D. Schuh, F. Woyt (†).

Gesamtleitung: Dr. R. Germershausen
Lektorat und Redaktion: E. Schaub

Vorwort

Das „Waffentechnische Taschenbuch" schließt an die Tradition des in früheren Jahren von unserem Hause herausgegebenen „Taschenbuch für den Artilleristen" an, das zuletzt 1961 als Nachdruck in einer 6. Auflage erschienen ist.

Da das alte „Taschenbuch für den Artilleristen" in seinen wesentlichen Teilen vor einigen Jahrzehnten entstand, war es für eine Neuerscheinung natürlich erforderlich, die Darstellung der angesprochenen Sachgebiete neu zu bearbeiten, um dem Fortschritt auf vielen dieser Sektoren gerecht zu werden. In diesem Zusammenhang haben wir uns auch für den allgemeineren Titel „Waffentechnisches Taschenbuch" entschlossen.

Selbstverständlich kann und will auch das neue Taschenbuch keinen Anspruch auf vollständige Behandlung der einzelnen Sachgebiete von den Explosivstoffen über die verschiedenen Teile der Ballistik, die Munition, die Geschütze, die Raketen bis hin zu den Feuerleitanlagen erheben. Vielmehr wurde versucht, eine gewisse Übersicht über verschiedene Bereiche der Waffentechnik zu geben, die einerseits den Fachmann, insbesondere auch den Praktiker, andererseits den an den letzten technischen Einzelheiten weniger Interessierten anspricht. Herausgeber und Autoren sind sich darüber im klaren, daß diese Absicht nur begrenzt verwirklicht werden konnte.

Die einzelnen Kapitel des Taschenbuches sind von den Fachleuten unseres Hauses über mehrere Jahre hinweg zusammengetragen worden. Soweit in den Texten auf Berechnungsverfahren eingegangen wurde und damit physikalische Größen angesprochen sind, wurden diese teilweise noch im „Technischen Einheitensystem" angegeben. Unter Berücksichtigung des „Gesetzes über Einheiten im Meßwesen" (Bundesgesetzblatt 1969, Teil I, Nr. 55, und 1970, Teil I, Nr. 62) ist jedoch in den zuletzt entstandenen Kapiteln bereits das auch in der Waffentechnik noch ungewohnte „Internationale Einheitensystem" verwendet worden.

Zur Erleichterung des Übergangs auf das „Internationale Einheitensystem" enthält das Kapitel 15.2 entsprechende Angaben. Für eine spätere Auflage des Buches ist vorgesehen, die verwendeten Größen insgesamt auf das neue Einheitensystem umzustellen.

Wir würden uns sehr freuen, wenn die Neuerscheinung unseres Taschenbuches viele interessierte Leser findet und so einen bescheidenen Beitrag zum Fachgespräch zwischen den Waffentechnikern der Truppe, der Dienststellen und der Industrie leisten könnte.

Düsseldorf, im Dezember 1972

Rheinmetall GmbH

Vorwort zur dritten Auflage

Nachdem das waffentechnische Taschenbuch im Jahre 1972 erschien, war die Nachfrage für dieses Buch so groß, daß wir kurz danach eine zweite Auflage herausgegeben haben, bei der einige Verbesserungen berücksichtigt wurden.

Da diese zweite Auflage inzwischen auch vergriffen ist, haben wir uns entschlossen, die vorliegende dritte Auflage herauszugeben. Dabei wurde der Inhalt verschiedener Kapitel überarbeitet, um den inzwischen erreichten technischen Fortschritt zu berücksichtigen; außerdem konnten wir die Anregungen von einer Reihe von Lesern bei dieser Bearbeitung berücksichtigen. Für diese Anregungen möchten wir an dieser Stelle herzlich danken.

Die überarbeitete dritte Auflage verwendet jetzt konsequent das neue „Internationale Einheitensystem".

Düsseldorf, im Januar 1977

Rheinmetall GmbH

Inhaltsverzeichnis

RHEINMETALL

ein Unternehmen der Wehrtechnik

Das Haus Rheinmetall kann inzwischen auf eine mehr als 85jährige Tradition im Waffenbau zurückblicken. Den Angehörigen der Bundeswehr und den NATO-Partnern ist das Unternehmen durch eine Reihe neuzeitlicher Waffenentwicklungen bekannt; überhaupt hat Rheinmetall sich seit seiner Gründung mit waffentechnischen Entwicklungen befaßt, die zum Teil richtungweisend waren.

Es wird hier ein kurzer Rückblick auf die Geschichte unseres Hauses und ein Überblick über unser Produktionsprogramm gegeben.

Rheinmetall wurde am 7. Mai 1889 als „Rheinische Metallwaaren- und Maschinenfabrik Akt.-Ges." in Düsseldorf gegründet. Anlaß war die Umbewaffnung der deutschen Armee mit dem Infanterie-Mantelgeschoß M 88. Mit dem Aufbau und der Leitung des Betriebes wurde Heinrich Ehrhardt betraut, der in der Folge die Geschicke der Firma über 30 Jahre lenkte und sie - nicht zuletzt aufgrund eigener, bahnbrechender waffentechnischer Entwicklungen — zu einem weltweit anerkannten Unternehmen der Waffentechnik ausbaute. Wichtige Schritte auf diesem Wege waren: 1892 Erwerb eines Schmiedewerkes in Düsseldorf-Rath und dessen Ausbau zu einem mit der Zeit weit über den Eigenbedarf hinausgehenden Stahlwerk; 1899 Übernahme der „Zündhütchen- und Gewehrfabrik Nikolaus Dreyse" in Sömmerda und Ausbau zur Zünderfabrik mit späterer Erweiterung für die Herstellung von Visieren, Infanteriewaffen und Maschinengewehren; ebenfalls 1899 Erwerb des Schießplatzes Unterlüß.

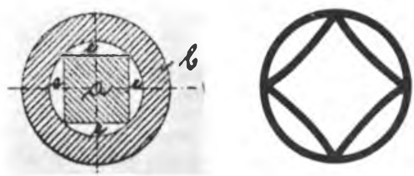


Bild 1. *Der Querschnitt eines quadratischen Stahlblocks in der zylindrischen Matrize wurde zum Rheinmetall-Zeichen.*

Entwicklung und Aufstieg der Firma beruhten in der Hauptsache auf dem von Heinrich Ehrhardt entwickelten Preß- und Ziehverfahren zur Herstellung nahtloser Hohlkörper, das als wichtige Erfindung in die Geschichte der Technik eingegangen ist. Das Verfahren basiert darauf, einen glühenden Vierkantstahlblock in einer zylindrischen Matrize mittels eines runden Dorns zu lochen und den entstandenen Preßling durch Warmziehen zu längen, so daß nahtlose Hohlkörper (Geschoßhüllen) und Stahlrohre entstehen (s. Bild 1).

Im Jahre 1898 baute Ehrhardt das erste felddiensttaugliche Rohrrücklaufgeschütz der Welt, eine 7,5-cm-Feldkanone. Diese nach kostspieligen Versuchen und langwierigen Auseinandersetzungen mit voreingenommenen Gegenspielern durchgesetzte Erfindung wurde, nachdem das Ausland mit ersten Bestellungen Schrittmacherdienste geleistet hatte, in wenigen Jahren bei den Artillerien der ganzen Welt – bei der deutschen Armee von 1904 an - eingeführt.



Bild 2. *Heinrich Ehrhardt, Gründer der „Rheinischen Metallwaaren- und Maschinenfabrik Akt.-Ges.", später „Rheinmetall", und Erfinder des ersten felddiensttauglichen Rohrrücklaufgeschützes der Welt, an der 7,5-cm-Feldkanone (1900).*

Im Ersten Weltkrieg versorgte Rheinmetall Heer, Marine und Luftwaffe mit Geschützen jeglicher Art wie Kanonen, Haubitzen, Mörser, Minenwerfer, Pak, Flak, Schiffs-, U-Boots- und Flugzeuggeschütze sowie Infanteriewaffen einschließlich aller Munition. Nach der Demontage aller für die Herstellung von Kriegsmaterial gebrauchten Maschinen und Einrichtungen lief bereits 1920 eine weitgestreute Zivilproduktion mit dem Bau von Lokomotiven, Waggons, Dampfpflügen und anderen landwirtschaftlichen Maschinen, Bergwerks- und Hüttenmaschinen an; im Werk Sömmerda wurde die Fertigung von Büromaschinen und Kraftfahrzeugteilen (Kardanwellen) aufgezogen und bis zum Zweiten Weltkrieg erfolgreich fortgeführt.

Erst nach 1925 wurde durch die alliierte Kontrollkommission wieder eine waffentechnische Entwicklung genehmigt. Nach dem Bau einer 7,5-cm-Feldkanone folgte die Entwicklung der 15-cm-Drillingstürme der fünf Kreuzer der K-Klasse sowie eines Feuerleitgerätes als Vorläufer der späteren Flak-Kommandogeräte.

Im Jahre 1933 wurde die Firma A. Borsig in Berlin-Tegel mit ihrem umfangreichen Maschinenbauprogramm übernommen, und ab 1936 führte das Unternehmen den Namen Rheinmetall-Borsig AG.

Waffentechnische Entwicklungen und Fertigungen jener Zeit bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges waren Waffen jeglicher Art für die drei Wehrmachtsteile einschließlich der Munition, u.a. Panzer, schwere Mörser (s. Bild 3) und Raketen.



Bild 3. *60-cm-Mörser „Karl", das bis heute dem Kaliber nach größte als komplette Einheit verlastbare Geschütz der Welt. 1937 Beginn der Entwicklung bei Rheinmetall; Fronteinsatz bei den Angriffen auf Brest-Litowsk 1941 und Sewastopol 1942.*

Neben der Entwicklung und Fertigung des Mörsers „Karl" (oder „Thor", wie ihn die Truppe nannte) einschließlich seiner 54-cm- und 60-cm-Granaten wurde bereits die Entwicklung ferngesteuerter Boden/Boden-Flugkörper betrieben. Die „Rheintochter" war eine zweistufige Flüssigkeitsrakete mit 40 km Reichweite, die vierstufige Feststoffrakete „Rheinbote" hatte eine Reichweite von 250 km. Die ferngesteuerte Fallbombe „Fritz X" trug eine Sprengladung von 350 kg Gewicht ins Ziel.

Die vorhandenen Produktionsstätten wurden vergrößert und neue Werke hinzuerworben: Berlin-Marienfelde, Alkett, Apolda, Guben und Breslau.

Das Jahr 1945 brachte die völlige Zerstörung und Demontage aller Produktionsstätten einschließlich des Schießplatzes Unterlüß.

Im Gegensatz zu vielen anderen Firmen konnte Rheinmetall nicht sofort an einen Wiederaufbau denken; über Jahre hinaus legte ein Produktionsverbot die Werke still. Erst im Herbst 1956 erhielten Teilbetriebe der alten Firma erstmals wieder eine Produktionsgenehmigung, und es konnte nach und nach mit dem Aufbau der bis auf zwei Gebäude noeh in Schutt und Asche liegenden Anlagen begonnen werden. Vorausgegangen war unter der Holding Rheinmetall-Borsig AG die Verselbständigung der beiden großen Fabrikationsstätten Rheinmetall Düsseldorf und Borsig Berlin als juristisch selbständige Aktiengesellschaften. Erst als im Zuge der Reprivatisierung die Übernahme der Aktienmehrheit der Berliner Holding, der Rheinmetall-Borsig AG, durch die Röchling'sche Eisen- und Stahlwerke GmbH in Völklingen/Saar erfolgte, begann der wirkliche Wiederaufbau in Düsseldorf. Das einstige Stammwerk wurde damit wieder zum Kern des Unternehmens. 1956 begann auch die Entwicklung von Waffen und Gerät für die Bundeswehr und andere NATO-Streitkräfte.

Zunächst einmal mußten die Grundlagen für die Wiedereinrichtung einer Waffenkonstruktion und -fertigung geschaffen werden. Konstrukteure und Facharbeiter waren kaum noch vorhanden. Langsam erst gelang es, aus zurückgekehrten ehemaligen Mitarbeitern wieder eine Kernmannschaft zu bilden, mit der die nötigen Grundlagen der neuen Waffenfertigung gelegt werden konnten. Bereits im Januar 1958 begann termingerecht die Auslieferung des Maschinengewehrs MG 1, einer auf das NATO-Kaliber 7,62 mm modifizierten Version der aus der Zeit vor dem Zweiten Weltkrieg stammenden, laufend verbesserten Konstruktion des MG 42. Es folgte die Serienfertigung der 20-mm-Maschinenkanone MK 20–1 (Lizenzbau der Hispano Suiza HS 820) und des automatischen Gewehrs G 3.



Bild 4. Das MG 3 als Nachfolger des MG 42 ist heute in der Bundeswehr und einigen NATO-Staaten eingeführt.

Rheinmetall ist heute einer der wesentlichen Partner der Bundesrepublik und der NATO bei der Entwicklung und Herstellung von Waffensystemen und Munition. Zum Bereich Wehrtechnik, der von der Rheinmetall GmbH repräsentiert wird, gehören auch die Firmen Rheinmetall-Industrietechnik GmbH in Düsseldorf, die sich mit der Produktionsanlagenplanung beschäftigt, die Nico-Pyrotechnik in Trittau, die unter anderem Leucht- und Signalmittel, Manöver- und Darstellungsmittel, Farbrauche, Nebelerzeuger und Tränengaserzeugermittel herstellt, und NWM de Kruithoorn B.V. in 's Hertogenbosch (Holland).

Voraussetzung für die erfolgreiche Bearbeitung wehrtechnischer Probleme ist eine zukunftsorientierte Forschung und Entwicklung, die durch ein Management ergänzt wird, das mit modernen Methoden, entsprechenden Hilfsmitteln und Planungstechniken Projektabläufe vorbestimmt, steuert und überwacht.

Waffen sind heute vielfach komplexe Systeme, die zwecks kostenmäßig und technisch optimaler Lösungen einer „Systemführung" bedürfen. Die Fertigung muß auf die Produktion kompletter Waffensysteme sowie die Serienherstellung von Einzelteilen eingerichtet sein. Nicht zuletzt gehört dazu eine Versuchs- und Erprobungsstelle, wie sie Rheinmetall in Unterlüß in der Lüneburger Heide besitzt. Diese größte in Firmenbesitz befindliche Anlage der Bundesrepublik verfügt über einen Schießplatz von nominal 15 km Länge bei rund 4 km Breite, der jedoch von Außenfeuerstellungen aus Schußweiten von 35 km zuläßt. Die Ausrüstung mit modernsten ballistischen und schießtechnischen Einrichtungen ist teilweise von der Firma selbst entwickelt worden.

In direkter Nachbarschaft zum Schießplatz befindet sich eine modern eingerichtete Munitionsanstalt, in der Munition im Kaliberbereich von 20 bis 203 mm laboriert wird.

Derzeitige Schwerpunkte des wehrtechnischen Programms

Maschinengewehr MG 3

Das bei der Deutschen Bundeswehr eingeführte Maschinengewehr MG 3 (Bild 4; Kal. 7,62 mm, Kadenz 700 bis 1300 Schuß/min), eine Weiterentwicklung des Maschinengewehrs MG 42, ist bei allen Truppenteilen im Einsatz. Es findet auch als Blenden-MG, Fla-MG und Bug-MG Verwendung.

Unter der werksinternen Bezeichnung MG 3e hat Rheinmetall eine gewichtserleichterte Version des MG 3 entwickelt. Durch Wahl anderer Werkstoffe und gezielte Materialeinsparungen ist es gelungen, das MG 3

um 2,2 kg im Gewicht zu erleichtern unter Beibehaltung der bisherigen Funktion, Treffleistung und Handhabung. Die Austauschbarkeit der Baugruppen und lösbaren Einzelteile mit den entsprechenden MG 3-Gruppen bzw. -Teilen ist gewährleistet.

Maschinenkanone MK 20 Rh 202

Die MK 20 Rh 202, eine von Rheinmetall entwickelte und gefertigte Maschinenkanone, ist in der Deutschen Bundeswehr eingeführt und findet in den verschiedensten Lafettierungen Verwendung als Tieffliegerabwehrwaffe und zur Erdzielbekämpfung (Bild 5).

Die Kanone ist als starrverriegelnder Gasdrucklader konstruiert. Ihre wesentlichen Vorteile liegen in der kurzen Bauart, der ballistischen Leistung, der Funktionssicherheit, auch unter extremen Bedingungen, und den niedrigen Rückstoßkräften.



Bild 5. *Maschinenkanone MK 20 Rh 202.*

Die Munitionszuführung erfolgt über einen Gurtzuführer, der von der Maschinenkanone getrennt in einem abklappbaren Rahmen der Lafette fest eingelagert ist. Zur Waffe gehören zwei wahlweise einsetzbare Gurtzuführer: ein Zweiweggurtzuführer mit schnellem Munitionswechsel und ein Dreiweggurtzuführer.

Die durch die Gurtzuführer gegebenen Variationsmöglichkeiten machen die MK 20 Rh 202 zu einer für die Tieffliegerabwehr und gegen Erdziele gleichermaßen geeigneten Waffe.

Die MK 20 Rh 202 läßt sich wegen ihrer kurzen Bauart, der Trennung des Gurtzuführers von der Kanone und der geringen Rückstoßkräfte für ein breites Spektrum von Waffenträgern und taktischen Aufgaben einsetzen.

Die Maschinenkanone verschießt Munition vom Kaliber 20 mm x 139 mit Mündungsgeschwindigkeiten von rund 1100 m/s und einer Feuerfolge von 800 – 1000 Schuß/min; die Kampfentfernung beträgt bis zu 2000 m.

MK 20 Rh 202 in Feldkanone 20 mm FK 20-2

Die Feldkanone 20 mm FK 20-2 besitzt eine MK 20 Rh 202 mit Dreiweg-Gurtzuführer und Erdziel-Fla-Visier (Bild 6).



Bild 6. Maschinenkanone MK 20 Rh 202 in FK 20-2.

MK 20 Rh 202 auf Bordlafette

Mit einer von der Firma Wegmann, Kassel, gebauten Bordlafette ist die MK 20 Rh 202 als Haupt- oder Nebenwaffe auf Schiffen oder im stationären Einsatz zum Schutz von Marinestützpunkten vorgesehen (Bild 7).



Bild 7. *Maschinenkanone MK 20 Rh 202 auf Bordlafette.*

MK 20 Rh 202 in Flak 20 mm Zwilling

Die von Rheinmetall entwickelte Flak 20 mm Zwilling (Bild 8) ist bei der Deutschen Bundeswehr eingeführt. Feuerleitanlage, Rundumschwenkbereich, Rohrerhöhung von – 5° bis + 83° und eine Schußleistung von etwa 2000 Schuß je Minute befähigen das Waffensystem zur wirksamen Bekämpfung von Tieffliegern und zum Erdkampfeinsatz. Das Einachsfahrgestell macht das System beweglich.



Bild 8. *Maschinenkanone MK 20 Rh 202 in Flak 20 mm Zwilling.*

MK 20 Rh 202 im Schützenpanzer Marder

Der Schützenpanzer Marder ist mit einer MK 20 Rh 202 in Scheitellafette als Hauptbewaffnung ausgerüstet (Bild 9).



Bild 9. *Maschinenkanone MK 20 Rh 202 im Schützenpanzer Marder.*

MK 20 Rh 202 im gepanzerten Spähwagen UR 416

Der gepanzerte Spähwagen UR 416 ist mit dem Rheinmetall-Einmann-Panzerturm TF 20.15 ausgerüstet (Bild 10).

Der TF 20.15 ist mit einer MK 20 Rh 202, wahlweise mit Dreiweg- und Zweiweg-Gurtzuführung, bestückt. Er ist für Radfahrzeuge und leicht gepanzerte Kettenfahrzeuge geeignet, die als gepanzerte Spähwagen für Aufklärungszwecke und als Begleitschutzfahrzeuge zur Bekämpfung von Erdzielen und von Luftzielen im Rahmen der Tieffliegerabwehr aller Truppen eingesetzt werden.



Bild 10. *MK 20 Rh 202 im gepanzerten Spähwagen UR 416 mit Rheinmetall-Einmann-Panzerturm TF 20.15.*

MK 20 Rh 202 in Mannschaftstransportwagen MTW M 113

Für den Mannschaftstransportwagen MTW M 113 ist ebenfalls der Rheinmetall-Einmann-Panzerturm TF 20.15 mit MK 20 Rh 202 mit Wechselgurtzuführer vorgesehen.

MK 20 Rh 202 in Mannschaftstransportwagen M 113 C + R

Für den Mannschaftstransportwagen M 113 C + R, der Aufklärungsversion des MTW M 113, hat Rheinmetall das Turmsystem TF 20.11 entwickelt, das als Einmannturm mit Zweiweg-Gurtzuführer trotz kleinster Einbauabmessungen volle Rundumsicht gestattet.

Auch hier dient die MK 20 Rh 202 als Hauptbewaffnung der Erd- und Luftzielbekämpfung.

MK 20 Rh 202 auf Achtrad-Spähpanzer

Für den Achtrad-Spähpanzer hat Rheinmetall das Zweimann-Turmsystem TS 7 mit einer MK 20 Rh 202 als Hauptbewaffnung entwickelt (Bild 11).



Bild 11. *Maschinenkanone MK 20 Rh 202 im Zweimann-Turmsystem TS 7 des Achtrad-Spähpanzers.*

MK 20 Rh 202 als Hubschrauberbewaffnung

Für Hubschrauber als Waffenträger hat Rheinmetall eine Lafette zur MK 20 Rh 202 entwickelt, die unter der Hubschrauberzelle angebracht und von dem Schützen aus dem Hubschrauber heraus fernbedient wird (Bild 12).



Bild 12. *Maschinenkanone MK 20 Rh 202 als Hubschrauberbewaffnung.*

Kanonenjagdpanzer

Die gesamte Waffenanlage des Kanonenjagdpanzers, bestehend aus einer 90-mm-Bordkanone, einem Blenden-MG in Kugelblende und einem Fla-MG, wurde von Rheinmetall entwickelt, gefertigt und montiert (Bild 13).



Bild 13. *Kanonenjagdpanzer.*

Kampfpanzer Leopard 1

Die Waffenanlage des Kampfpanzers Leopard für die 105-mm-Kanone und zwei MG wurde von Rheinmetall entwickelt. Im Rheinmetall-Werk Düsseldorf werden Einzelteile hergestellt sowie vollständige Panzertürme montiert (Bilder 14 und 15).



Bild 14. *Kampfpanzer Leopard.*



Bild 15. *Montage des Turmes für den Kampfpanzer Leopard 1 im Rheinmetall-Werk Düsseldorf.*

Für die 90-mm-Kanone des KJPz und die 105-mm-Kanone des Leopard hat Rheinmetall auch die entsprechende Übungs- und Leuchtmunition entwickelt.

Panzerhaubitze M 109 G

Die bei der Deutschen Bundeswehr eingeführte Panzerhaubitze M 109 G (Bild 16) konnte durch einen neuen, von Rheinmetall entwickelten Verschluß eine wesentlich höhere Schußfolge erreichen und damit in der Leistung erheblich gesteigert werden. Außerdem wurde für dieses Geschütz eine neue Zieleinrichtung entwickelt. Die Montage der kompletten Waffenanlage erfolgt bei Rheinmetall.



Bild 16. *Panzerhaubitze M 109 G.*

155 mm FH 70

Die 155-mm-Feldhaubitze mit der dazugehörigen Munitionsfamilie ist eine trilaterale Entwicklung von England, Deutschland und Italien, an der Rheinmetall aufgrund der Entwicklung der höhenrichtbaren Teile (Kanone und Rücklaufsystem) und der Sondermunition wesentlich beteiligt ist.

155 mm PzH 70

Ebenfalls wesentlich beteiligt ist Rheinmetall an der trilateralen Entwicklung der 155 mm Panzerhaubitze 70. Mit der PzH 70 läßt sich die im Zusammenhang mit der FH 70 entwickelte Munition verschießen.

Neue Generation Panzerkanone 105 mm/120 mm

Für die Folgegeneration des Leopard 1 hat Rheinmetall die Waffe und Munition im Kaliber 105 und 120 mm entwickelt (Bilder 17 und 18). Diese Entwicklung zeichnet sich durch ein glattes Rohr und flügelstabilisierte Munition aus. Das glatte 105-mm-Rohr eignet sich insbesondere für die Steigerung der Feuerkraft von eingeführten Panzern.

Die 120-mm-Kanone stellt eine weit fortgeschrittene Waffe dar, die als Panzerbewaffnung für die 80er Jahre und wohl darüber hinaus anzusehen ist[1]).



Bild 17. *120-mm-Glattrohrkanone Rheinmetall.*

[1]) Meller, R.: Die 120-mm-Glattrohrkanone von Rheinmetall. Internat. Wehrrevue (9) 1976, Nr. 4 (August), S. 619 — 624.

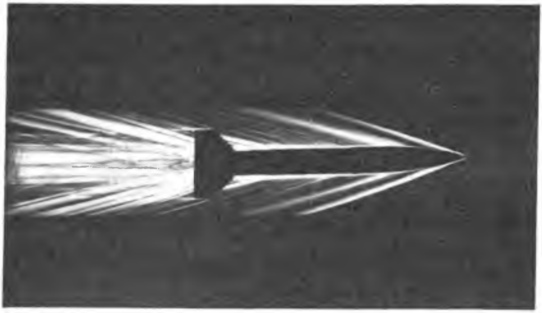


Bild 18. *120-mm-KE-Geschoß (Schlierenaufnahme).*

Raketen

Das Entwicklungsteam der Rheinmetall ist auch auf dem Gebiet von nachbeschleunigten Geschossen und Raketen, insbesondere für die Panzerbekämpfung, tätig.

Als Beispiel sei die Panzerabwehrwaffe „Hellebarde" erwähnt, eine Düsenkanone von 75 mm Kaliber, die als Einbauwaffe leichtgepanzerter Fahrzeuge flügelstabilisierte Hohlladungsraketen bis auf Kampfentfernungen von 1000 m verschießt (Bild 19). Die konsequente Verfolgung des Prinzips der vollständigen Widerstandskompensation bei dieser Entwicklung führte zu einem Geschoß, das vollkommen unempfindlich gegen jede Art von Querwind ist. Die erzielten Treffbilder sind denen einer guten Panzerkanone gleichzusetzen.



Bild 19. *Rheinmetall-Panzerabwehrwaffe „Hellebarde" auf dem Schützenpanzer Marder beim Schuß.*

Wehrtechnisches Produktionsprogramm

Turm- und Waffenanlagen für Kampfpanzer und gepanzerte Fahrzeuge
Panzerbordkanonen
Panzerhaubitzen und Artilleriegeschütze
Fla-Waffenanlagen
Raketen und Raketenabschußsysteme
Maschinenkanonen
Infanteriewaffen
Gefechts- und Übungsmunition
Manöver- und Darstellungsmunition
Treibladungsanzünder
Elektrische Abfeuerungs- und Schußfolgesysteme
Elektronische Meß- und Steuersysteme
Ballistik-Meßsysteme
Durchführung von Systemstudien
Planung und Vertrieb von Produktionsanlagen

1. Explosivstoffe

1.1. Allgemeines

Die Explosivstoffe nehmen als chemische Energieträger in der Wehrtechnik in Form von Treibstoffen zum Antrieb von Projektilen und als Sprengstoffe zur Erzeugung von Schäden im Ziel eine entscheidende Schlüsselposition ein, die eines geschichtlichen Rückblickes wert ist.

Nach dem Bekanntwerden des Schwarzpulvers in Europa (Beginn des 13. Jahrhunderts n. Chr. aus China) und der ersten Anwendung für den Schuß aus der „Büchse" durch den historisch nicht mit Sicherheit zu belegenden Berthold Schwarz um 1300 vergingen mehrere Jahrhunderte, bis in der Mitte des 19. Jh. weitere Stoffe entdeckt wurden, die neben den bis dahin einzigen Explosivstoff Schwarzpulver traten und ihn dann sehr bald in großem Umfang ersetzt haben.

Vorläufer dieser Entwicklung waren BERTHOLLET, der 1788 Versuche unternahm, den Salpeter im Schwarzpulver durch Kaliumchlorat zu ersetzen und das „schwarze" Knallsilber (Ag_3N) entdeckte, HOWARD mit dem Knallquecksilber (1799) und BRUGNATELLI mit dem Knallsilber (CNOAg) im Jahre 1802.

Die modernen Explosivstoffe beruhen im wesentlichen auf der Nitrierung von Kohlenwasserstoffen unterschiedlichster Konstitution. Dieser Weg wurde begonnen mit dem Nitrobenzol (1834), dem Nitronaphthalin (1835) und der Pikrinsäure (1843); seine ersten entscheidenden Stationen waren, auf das gleiche Jahr 1846 zusammenfallend, die Entdeckung des Nitroglycerins durch SOBRERO und der Schießbaumwolle durch SCHÖNBEIN. Es folgen die für den technischen Einsatz dieser Stoffe bedeutsamen Arbeiten von A. NOBEL: 1867 Gur-Dynamit (75 % Nitroglycerin/25% Kieselgur),

1875 Sprenggelatine (92% Nitroglycerin/8% Kollodiumwolle), 1888 das erste zweibasige Geschützpulver „Ballistit" (Nitroglycerin/Nitrocellulose).

Die Gelatinierung und definierte Formgebung der Nitrocellulose mit Hilfe von Lösungsmitteln wurde von REID und JOHNSON (1882), DUTTENHOFER (1884) und VIEILLE (1885) mit dem Poudre „B" bearbeitet.

Im Jahre 1889 entwickelten ABEL und DEWAR das zweibasige „Cordite", welches gegenüber dem „Ballistit" von NOBEL energiereicher ist. Während die Herstellungsverfahren für „Cordite" und „Ballistit" mit Lösungsmitteln arbeiten, wurde 1909 in Deutschland ein lösungsmittelfreier Prozeß für zweibasige Pulver gefunden.

Im Zweiten Weltkrieg wurden dann die „kalten" Pulver mit Diglykoldinitrat und Nitroguanidin entwickelt, die mit dem Namen GALLWITZ verbunden sind.

Bei den Sprengstoffen ist nach NOBELs Gur-Dynamit der Einsatz der Pikrinsäure als Füllung von Sprenggeschossen zu nennen, die nach STETTBACHER [1] auf TURPIN (1885) zurückgeht. Damit war der Beginn der „Brisanzartillerie" und der Bomben gesetzt.

Um den Nachteil der Giftigkeit und der Bildung stoßempfindlicher Salze bei der Pikrinsäure zu vermeiden, griff man später auf das seit 1863 bekannte Trinitrotoluol (TNT) zurück, das zu Beginn dieses Jahrhunderts im technischen Maßstab verfügbar wurde.

1877 fand MERTENS das Tetryl, 1898 HENNING das Hexogen; das Patent zur Herstellung von Nitropenta stammt aus dem Jahre 1912.

Neben den am meisten verwendeten Sprengstoffen TNT und Hexogen gewinnt in den letzten Jahren das Oktogen wegen seines gegenüber dem Hexogen größeren Energieinhalts je Volumeneinheit an Bedeutung.

Die Entdeckung der klassischen Explosivstoffe, deren Wirkung auf dem Freisetzen chemischer Energie beruht, hat also mit dem Beginn dieses Jahrhunderts einen gewissen Abschluß gefunden.

Der Beginn einer neuen waffentechnischen „Ära", zumindest vergleichbar mit der ersten ballistischen Anwendung des Schwarzpulvers und den geschichtlichen Konsequenzen daraus, wurde gesetzt mit der Zündung der ersten Atombombe im Sommer 1945 in New Mexico, USA. Dieses technische Ereignis wurde ermöglicht durch die Forschungsarbeiten von zwei Generationen von Kernphysikern, als deren Vertreter RUTHERFORD mit der Entdeckung der ersten künstlichen Kernreaktion 1919 und O. HAHN und F. STRASSMANN mit dem bahnbrechenden Nachweis des Uranzerfalls durch Neutronenbestrahlung (1938) genannt seien.

Betrachtet man die technische Entwicklung militärischen Gerätes seit 1945, so ist unter dem Aspekt der Explosivstoffe festzustellen:

Atomare und klassische Waffen bestehen nebeneinander. (Nach modernen strategischen Konzeptionen liegt hier eine bewußte Ergänzung vor.)

Für den Antrieb auch von Trägern atomarer Gefechtsköpfe werden weiterhin chemische Treibstoffe verwendet. Selbst bei den großen Interkontinentalraketen wäre ein Atomreaktor als Quelle der Antriebsenergie heute noch nicht praktikabel.

Die klassischen Explosivstoffe werden in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften intensiv erforscht und, soweit möglich, weiterentwickelt, um eine optimale Auslegung und Leistungssteigerung neuer Waffen zu ermöglichen.

Nach diesem kurzen historischen Überblick noch einige allgemeine Bemerkungen.

Die Explosivstoffe zeichnen sich gegenüber den üblichen Brennstoffen wie Kohle, Erdölprodukten und Holz dadurch aus, daß sie den Oxidator bereits in gebundener Form enthalten. Daher ist die Energieabgabe je Masseneinheit (Explosionswärme) beim Explosivstoff mit rd. $5 \cdot 10^3$ kJ/kg erheblich geringer als beim Brennstoff ($43 \cdot 10^3$ kJ/kg für Benzin), der den Sauerstoff aus der Atmosphäre nimmt. Andererseits jedoch, und das ist die entscheidende Eigenschaft der Explosivstoffe, werden durch den chemisch gebundenen und feinstverteilten Sauerstoff unter Einschluß oder durch Selbstverdämmung sehr große Abbrandgeschwindigkeiten erreicht, die kurzseitig zu extrem hohen Energiedichten (Drücken) führen.

Hierzu hat STETTBACHER [1] ein sehr instruktives Beispiel angegeben, das hier in modifizierter Form zitiert wird:

Eine Masse von 2500 kg eines Sprengstoffes mit der Explosionswärme $Q_{ex} = 6700$ kJ/kg detoniert in 500 μs. Dabei wird eine Energie von $2500 \cdot 6700 = 16{,}75 \cdot 10^6$ kJ = 4650 kWh frei. Die Weltproduktion an Energie im Jahre 1966 betrug $3{,}5 \cdot 10^{12}$ kWh. Damit könnte die Energie der betrachteten Ladung $7{,}53 \cdot 10^8$ mal im Jahr erzeugt werden. Die von der Sprengladung abgegebene Leistung ist nun $4650 \times 3600 : 5 \cdot 10^{-4} = 3{,}35 \cdot 10^{10}$ kW. Die gesamte Kraftwerkskapazität der Welt belief sich bei 360 Betriebstagen zu 24 h auf $4{,}05 \cdot 10^8$ kW, d.h., es wäre für die gleiche Leistungsabgabe wie bei der detonierenden Sprengstoffladung das 82,7fache der 1966 erzeugten Weltenergieproduktion erforderlich.

Die Unterscheidung der Explosivstoffe in die beiden Hauptgruppen Treibstoffe und Sprengstoffe ist weniger grundsätzlicher Art; sie erfolgt

nach den Bereichen der Abbrandgeschwindigkeit, für welche die verschiedenen Verbindungen oder Gemenge sich vorzugsweise eignen. Als Geschützpulver verwendete Explosivstoffe setzen sich je nach Explosionswärme mit starker Druckabhängigkeit und linearen Abbrandgeschwindigkeiten von 10 bis 1000 mm/s (20 bar $< p <$ 4000 bar) um. Die Detonationsgeschwindigkeiten von Sprengstoffen liegen bei 2 bis fast 9 km/s, also bis zu sechs Größenordnungen höher.

Die exotherme Umsetzung der Explosivstoffe und Treibstoffe erfolgt durch chemische Reaktion, d.h. Änderungen im Zustand der Elektronenhülle der beteiligten Atome. Diese Zerfalls- bzw. Umsetzungsreaktionen laufen im aktivierten Zustand über Atome, Molekülbruchstücke, Ionen und Radikale zu stabilen Endprodukten.

Die maximalen Verbrennungswärmen chemischer Brennstoff-Oxidator-Mischungen für Geschoß- und Raketenantriebe liegen bei knapp 25000 kJ/kg ($Be + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow BeO$ + 23950 kJ/kg; $\frac{1}{2} H_2 + \frac{1}{2} F_2 \rightarrow HF$ + 13500 kJ/kg. Die maximal überhaupt auftretende „chemische" Wärmetönung wäre die Rekombinationswärme des Wasserstoffmoleküls aus seinen Atomen $2\,H \rightarrow H_2$ mit 216000 kJ/kg. Dieser Betrag ist die theoretische und praktische Grenze für die Energieabgabe bei chemischen Reaktionen [2], [3], [4], [5].

Die in einer atomaren (besser: nuklearen) Sprengladung freigesetzten Energien entstehen durch Vorgänge im Atomkern. Da die Wechselwirkungskräfte zwischen den Nukleonen (Elementarteilchen, die den Atomkern aufbauen) im Nahbereich wesentlich größer sind als die Coulomb-Kräfte zwischen der Elektronenhülle und dem Atomkern, hat die bei Kernreaktionen mögliche Wärmetönung so gigantisch hohe Werte.

Exotherme Kernreaktionen sind der Zerfall von Kernen hoher Ordnungszahl (Uran-/Plutoniumbombe) und die Verschmelzung von Kernen niedriger Ordnungszahl (Wasserstoffbombe). Bei der Spaltung von Uran treten $7{,}1 \cdot 10^{10}$ kJ/kg und bei der Verschmelzung von ${}_1T^3 + {}_1D^2 \rightarrow {}_2He^4 + n$ gleich $34{,}3 \cdot 10^{10}$ kJ/kg auf (T = Tritium, D = Deuterium, He = Helium, n = Neutron) [4].

Der Energieinhalt von nuklearen Gefechtsköpfen wird als Äquivalenzmasse an TNT angegeben. Interkontinentalraketen tragen heute Gefechtsköpfe entsprechend etwa 50 Megatonnen TNT.

Die nachfolgenden Abschnitte behandeln in den gebotenen Grenzen hinsichtlich der Ausführlichkeit die chemischen Explosivstoffe. Ein weiteres Eingehen auf die nuklearen Sprengladungen gehört nicht in den Rahmen dieses Taschenbuches, der durch die konventionelle Waffentechnik abgesteckt ist. Für weitere Einzelheiten zu den Nuklearwaffen, insbesondere deren Wirkung, wird auf das Buch „The Effects of Nuclear Weapons" [33] verwiesen.

1.2. Einteilung explosiver Stoffe [6] [7]

Explosive oder explosionsfähige Stoffe werden nach einem Vorschlag der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin, gemäß dem in Bild 101 dargestellten Schema eingeteilt.

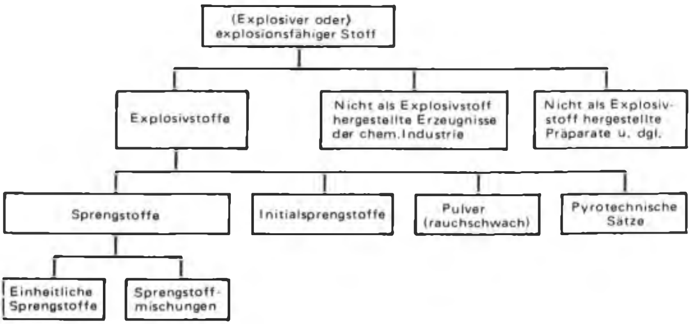


Bild 101. *Einteilung der explosionsfähigen Stoffe.*

Die einzelnen Stoffgruppen und Untergruppen umfassen:

Unter **Sprengstoffe, Einheitliche Sprengstoffe**

a)	Salpetersäureester	:	Nitroglycerin, Nitropenta, Nitromannit, Glykoldinitrat
b)	Nitrokörper	:	Pikrinsäure, Trinitrotoluol
c)	Nitramin	:	Hexogen, Oktogen
d)	Nitrosamin	:	Trimethylentrinitrosamin
e)	Salze	:	Ammoniumpikrat

Unter **Sprengstoffe, Sprengstoffmischungen**

Schwarzpulver
Nitroglycerinsprengstoff
Ammonsalpetersprengstoff
Chloratsprengstoff
Flüssigluftsprengstoff

Unter **Initialsprengstoffe**

Knallquecksilber
Bleiazid
Bleitrinitroresorcinat
Diazodinitrophenol
Silberfulminat
Chlorat-Phosphor-Salz

Unter **Pulver (rauchschwach)**

a) mit flüchtigem Lösungsmittel hergestellt: Nitrocellulosepulver

b) ohne Lösungsmittel hergestellt (POL-Pulver):
Nitroglycerin- oder Diglycolpulver

c) POL-Pulver mit kristallinen Nitroverbindungen:
Nitroguanidinpulver, Guanidinnitratpulver

Unter **Pyrotechnischen Sätzen**

Leucht- und Signalsätze
Knallsätze
Treibsätze
Pfeifsätze
Rauch-, Nebel- und Gassätze
Blitzlichtsätze

Zu den *nicht als Explosivstoff* hergestellten Erzeugnissen der chemischen Industrie gehören:

Ammonsalpeter für Düngesalze – Nitrokörper, anorganische Nitrat- und Chloratmischungen für Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel – Azonitril, Sulfohydrazide und Dinitrosopentamethylentetramin in Blähmitteln für die Kunststoff- und Gummiindustrie – Organisches Per- und Hydroperoxid als Polymerisationskatalysator in der Kunststoffindustrie – Nitrokörper und Salpetersäureester für pharmazeutische Mittel – Azo- und Diazoverbindungen in Bleich- und Waschmitteln – Nitrocellulose für Nitrolack, Nitrofilm und Nitroseide – Explosive Gase wie Acetylen, Chlordioxid u.a.

Nicht als Explosivstoff hergestellte Präparate und dgl. umfassen:

Ammoniumbromat – Ammoniumchlorat – Ammoniumnitrit – Azidoamin-chromsalze – Ätherperoxid – Äthylenozonid – Bleibromat-bleiacetat – Bleitetraacetat – Calciumazid – Chlorheptoxid – Chlorstickstoff – Dijodacetylen – Halogenazide – Halogenisierte Kohlenwasserstoffe mit Alkali- oder Erdalkalimetallen – Hydrazinnitrat – Jodstickstoff – Knallgold – Knallplatin – Knallsilber Ag_3N – Manganheptoxid – Metallpikrate – Metallsalze des Hydrazins – Natriumnitromethan – Organische Chlorate und Perchlorate – Perchlorsäure 100%ig – Quecksilberoxalat – Quecksilberoxinid – Schwefelstickstoff – Silberchlorat – Silberoxalat – Silberpersulfat – Strontiumazid – Zinkchlorat u.a.

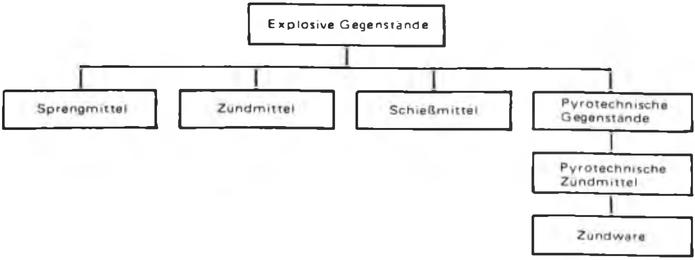


Bild 102. *Einteilung der explosiven Gegenstände.*

Die Unterteilung der aus Explosivstoffen hergestellten Gegenstände ist in Bild 102 angegeben. Zu den einzelnen Gruppen zählen:

Unter **Sprengmittel**

a) Pulversprengmittel: Sprengpulver, Sprengsalpeter

b) Brisante Gesteinsprengmittel: Dynamit, Sprenggelatine, Ammonit, Donarit, Ammon-Gelit, Cloratit, Oxyliquit

c) Wettersprengmittel: Wetter-Nobelit, Wetter-Wasagit, Wetter-Detonit, Wetter-Westfalit, Wetter-Astralit, Wetter-Bicarbit, Wetter-Salit

d) Brunnenpatronen: Trinitrotoluol-Hexogen (Trixogen), Ammon-Gelit, Triamin, Seismo-Gelit, Seismotolit

Unter **Zündmittel**

a) Sprengkräftige: Sprengkapseln, elektrische Zünder mit Sprengkapsel, Sprengschnur

b) Nicht sprengkräftige: Elektrische Zünder ohne Sprengkapsel, Pulverzündschnur und Anzünder, Anzündlitze, Anzündhütchen

Außerdem: Sprengniete, Flobertmunition, Zündblättchen, Knallkorken, Knallziehbänder

Unter **Schießmittel**

Patronen für Handfeuerwaffen
Patronen für Leucht- und Signalmunition
Kartuschen für Schußapparate zu technischen Zwecken
Raketen

Unter **Pyrotechnische Gegenstände**

Feuerwerksspielwaren
Kleinfeuerwerk
Gartenfeuerwerk
Pyrotechnische Gegenstände für technische Zwecke
Großfeuerwerk

Unter **Pyrotechnische Zündmittel**

Stoppine, Zündschnur

Unter **Zündware**
Zündhölzer

1.3. Pulver

Wie in der Einleitung ausgeführt, dienen Pulver, also chemische Treibstoffe, zum Antrieb von Projektilen, die ihrerseits einen Wirkteil in das vorgesehene Ziel transportieren. Diese Projektile können vorliegen als Geschosse, die in einem Waffenrohr beschleunigt werden und dann – bedingt durch die Anfangsgeschwindigkeit nach Verlassen des Rohres – ohne Antrieb fliegen, oder als Raketen, die auf einem Teil oder der gesamten Länge der Flugbahn einen Antrieb erfahren. Bei den nachbeschleunigten Geschossen liegt eine Kombination von Antrieb im Rohr und Raketenantrieb vor.

Mit Hinblick auf Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung, auf teilweise andere Aggregatzustände und andere Herstellverfahren unterscheidet man zwischen Geschützpulvern und Raketentreibstoffen.

1.3.1. Geschützpulver

1.3.1.1. Nitrocellulosepulver

Bei der Munition für Infanteriewaffen und für automatische Kanonen, aber auch für großkalibrige Waffen finden *einbasige* Pulver, die aus Nitrocellulose mit geringen Zusätzen bestehen, weite Anwendung. Diese Pulver werden als Nitrocellulose- oder Nc-Pulver bezeichnet.

Nitrocellulose ist ein Nitratester der Cellulose. Sie entsteht durch Einwirken von Nitriersäure (Salpetersäure und Schwefelsäure) auf Baumwolle oder Holzzellstoff. Die Bruttoformel lautet bei vollständiger Nitrierung

$$[C_6H_7O_2(ONO_2)_3]_n.$$

Der Grad der Nitrierung wird durch den Stickstoffgehalt angegeben. Aus der vorstehenden Bruttoformel ergäbe sich ein Stickstoffgehalt von 14,14 %; praktisch erreicht wird ein Stickstoffgehalt von etwa 13,4 %. Für die Pulverherstellung werden *Schießbaumwolle* mit 13,0 bis 13,4 % Stickstoff und *Kollodiumwolle* mit 12,0 bis 12,6 % Stickstoff verwendet.

Der Prozeß der Pulverherstellung [8] verläuft so, daß die Nitrocellulose zunächst mit einem flüchtigen *Lösungsmittel*, im allgemeinen einer Äther-Alkohol-Mischung, gelatiniert und das Gel dann zu Strängen der gewünschten Querschnittsgeometrie gepreßt wird. Die Stränge werden auf eine einheitliche Länge (z.B. als Röhren- oder Schnittpulver) geschnitten. Anschließend wird das Lösungsmittel verdampft; dabei tritt eine erhebliche Schrumpfung ein, so daß erst nach vollständigem Austritt des Lösungsmittels die endgültige Wandstärke vorliegt. Der Pulverstrang hat also beim Verlassen der Pulverpresse eine größere Wandstärke als nach dem Abschluß des Herstellungsprozesses, wonach erst die ballistisch effektive Wandstärke vorliegt. Daher gehört zur Bemessung der Preßmatrizen viel Erfahrung.

Der Nitrocellulose werden Stabilisatoren wie Akardit oder Zentralit zugesetzt, die gleichzeitig die Gelatinierung fördern. Die Wirkung der Stabilisatoren beruht darauf, daß freiwerdende nitrose Gase, die autokatalytisch auf die Zersetzung wirken würden, gebunden werden.

Zur Beeinflussung der linearen Abbrandgeschwindigkeit, um z.B. einen progressiven Abbrand zu erreichen, werden Nc-Pulver oberflächenbehandelt. Die Oberflächenbehandlung besteht darin, daß man Substanzen mit geringem Dampfdruck wie Arkadit, Zentralit, Diphenylamin, Dibutylphthalat oder Kampfer in das Pulverkorn eindiffundieren läßt. Diese Zusatzstoffe führen in den äußeren Schichten zu einer Reduzierung der Explosionswärme und damit der linearen Abbrandgeschwindigkeit.

Um elektrostatische Aufladungen zu vermeiden und um das Schüttgewicht zu erhöhen, bringt man auf die Oberfläche von Nc-Pulvern Graphit auf.

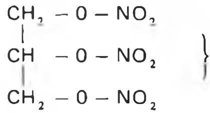
1.3.1.2. Pulver ohne Lösungsmittel

Bei Pulvern ohne Lösungsmittel (POL-Pulver) unterscheidet man zweibasige und dreibasige Pulver.

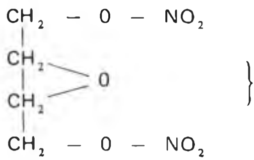
1.3.1.2.1. Zweibasige Pulver

Nitrocellulose läßt sich mit den wenig flüchtigen Flüssigkeiten *Nitroglycerin* und *Diglykoldinitrat* gelatinieren.

Die Strukturformel dieser Substanzen ist:



Nitroglycerin



Diglykoldinitrat

Die Herstellung erfolgt bei *Nitroglycerinpulvern* in der Weise, daß die Nitrocellulose im Wasser aufgeschwemmt und dann das Nitroglycerin unter Rühren der Suspension zugegeben wird. Dabei wird das Nitroglycerin von der Nitrocellulose absorbiert. Nachdem das Wasser abgeschieden wurde, erfolgt eine Durchgelatinierung durch wiederholte Bearbeitung in Walzen oder Schneckenpressen. (In den USA und England wird teilweise die Gelatinierung über das flüchtige Lösungsmittel Aceton vorgenommen.) Die weitere Formgebung des Gels zum Pulverkorn erfolgt bei erhöhter Temperatur in Strangpressen oder Walzen.

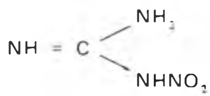
Mit Nitroglycerinpulvern werden bei Nitroglyceringehalten von 25 bis 50% Explosionswärmen von 2900 bis 5200 kJ/kg erreicht, wobei für niedrige Explosionswärmen Nitrocellulose mit geringem Stickstoffgehalt verwendet wird.

Wenn man die Nitrocellulose mit *Diglykoldinitrat* gelatiniert, entstehen die sogenannten „kalten" Pulver, die sich durch eine geringe Explosionswärme und damit eine geringe Explosionstemperatur auszeichnen. Auf diese Weise wird der Rohrverschleiß erheblich gemindert. Da andererseits jedoch das spezifische Gasvolumen höher ist als bei Nitrocellulose- oder Nitroglycerinpulvern, kann mit Diglykoldinitratpulvern noch eine ausreichende ballistische Leistung erreicht werden.

1.3.1.2.2. Dreibasige Pulver

Wird Diglykoldinitratpulver als dritte Komponente Nitroguanidin zugefügt, erhält man das *Nitroguanidinpulver,* das ebenfalls ein „kaltes" Pulver ist.

Nitroguanidin ist ein kristalliner Feststoff mit folgender Strukturformel:



Der Gehalt an Nitroguanidin in Pulvern variiert zwischen 25 und 50 %.

Kalte Pulver wurden in Deutschland während des Zweiten Weltkrieges entwickelt. Wegen der verminderten Rohrerosion des Nitroguanidins im Verein mit Diglykoldinitrat wird Nitroguanidinpulver heute wieder für Panzer- und Artilleriemunition verwendet.

Ein weiteres dreibasiges Pulver, das *Ammonpulver*, hat keine praktische Bedeutung erlangt. Dabei handelt es sich um ein POL-Pulver, in das bis zu 55% Ammonnitrat (NH_4NO_3) eingearbeitet wurde. Der Nachteil der Ammonpulver besteht insbesondere in der starken Hygroskopizität.

1.3.2. Raketentreibstoffe [1)]

Die Raketentreibstoffe [3], [4] werden nach ihrem Aggregatzustand wie folgt unterteilt:

Flüssigtreibstoffe, bei denen der einheitliche Treibstoff oder Brennstoff und der Oxidator als getrennte Flüssigkeiten in Tanks lagern, aus denen sie in die Brennkammer gefördert werden.

Festtreibstoffe, bei denen der Treibstoff als einheitliche Substanz oder als Gemenge von Substanzen in fester Form mit definierter Oberfläche in der Brennkammer angeordnet ist.

Lithergole (hybride Treibstoffe), bei denen der Brennstoff (normaler Typ) oder der Oxidator (inverser Typ) in fester Form in der Brennkammer vorliegt und der Oxidator bzw. der Brennstoff in flüssiger Form aus einem Tank der Brennkammer zugeführt wird.

1.3.2.1. Flüssigtreibstoffe

Bei den Flüssigtreibstoffen ist zunächst die Gruppe der *Monergole* zu nennen. Man unterscheidet einfache und zusammengesetzte Monergole;

---

1) Vgl. 2.3, Innere Ballistik der Raketen.

bei den einfachen handelt es sich um chemisch reine Einzelstoffe, bei den zusammengesetzten um abgemischte Treibstoffe, die aus meist zwei Komponenten bestehen und lagerfähig sind. Bei Zuführung von Zündenergie zerfallen die Monergole spontan und setzen sich exotherm in gasförmige Reaktionsprodukte um.

Beispiele für Monergole gibt die Tabelle 101 an, deren Daten aus DADIEU-DAMM-SCHMIDT [4] entnommen wurden.

Substanz	Chemische Zusammensetzung	Spezifischer Impuls I_s(m/s)
Nitromethan	CH_3NO_2	2500
Hydrazin	N_2H_4	1950
Hydrazin/Hydrazinnitrat	N_2H_4 +30% $N_2H_5NO_3$	2160
Äthylenoxid	C_2H_4O	1950
Tetranitromethan	$C(NO_2)_4$	1780
Wasserstoffperoxid	H_2O_2	1620

Tabelle 101. *Monergoltreibstoffe.*

Die Monergole haben, abgesehen vom Nitromethan und Mischungen von Hydrazin mit Hydrazinmononitrat, einen vergleichsweise geringen *spezifischen Impuls*, der das Kriterium für die ballistische Leistung der Treibstoffe ist (s. Innere Ballistik der Raketen, 2.3.3, S. 120). Die in der Tabelle 101 angegebenen Werte sind theoretische Gleichgewichtswerte.

Da Nitromethan sehr explosionsempfindlich ist, kann es in reiner Form in der Raketentechnik nicht verwendet werden. (Die Anwendung des Systems Hydrazin/Hydrazinnitrat wird untersucht.) Die übrigen angegebenen Monergole, vor allem Hydrazin und Wasserstoffperoxid, finden für Steuer- und Hilfsantriebe Verwendung.

Diergole sind solche Treibstoffe, bei denen Brennstoff und Oxidator der Brennkammer getrennt zugeführt werden.

Als *Brennstoffe* werden Wasserstoff, Kohlenwasserstoffe, Hydrazin und Hydrazinderivate, Amide, Ammoniak, Alkohole und Borane verwendet.

Die wichtigsten *Oxidatoren* sind Sauerstoff, Fluor, Salpetersäure, Stickoxide, Wasserstoffperoxid, Sauerstoffdifluorid.

In der Tabelle 102 sind die chemische Zusammensetzung und die Siedetemperatur T_S von einheitlichen flüssigen Raketenbrennstoffen angegeben.

Brennstoff	Chemische Zusammensetzung	Siedetemperatur T_S (°C)
Wasserstoff	H_2	− 252,8
Kerosin (RP−1)	$C_{11,7}H_{21,8}$	+ 140 bis +250
Methan	CH_4	− 161,7
Äthylen	C_2H_4	− 103,5
Hydrazin	N_2H_4	+ 113,5
Monomethylhydrazin (MMH)	CH_3NNH_2	+ 87,5
Unsymmetrisches Dimethylhydrazin (UDMH)	$(CH_3)_2NNH_2$	+ 63
Anilin	$C_6H_5NH_2$	+ 184,4
Diäthylentriamin (DETA)	$H_2NCH_2CH_2NH$ $CH_2CH_2NH_2$	+ 207
Ammoniak	NH_3	− 33,4
Äthylalkohol	C_2H_5OH	+ 78,4
Diboran	B_2H_6	− 92,5
Pentaboran	B_5H_9	+ 60,1

Tabelle 102. *Einheitliche flüssige Raketenbrennstoffe.*

Die Brennstoffe nach Tabelle 102 werden allein oder in Mischungen eingesetzt. Wichtige gemischte flüssige Brennstoffe sind:

Aerozin 50 (50 % UDMH + 50 % Hydrazin)
Hydyne (60 % UDMH + 40 % DETA).

Die technisch bedeutsamen Oxidatoren sind in der Tabelle 103 zusammengestellt.

Oxidator	Chemische Zusammensetzung	Siedetemperatur T_S (°C)
Sauerstoff	O_2	− 183
Fluor	F_2	− 188
Salpetersäure	HNO_3	+ 84
Distickstofftetroxid	N_2O_4	+ 21,1
Wasserstoffperoxid	H_2O_2	+ 150
Sauerstoffdifluorid	OF_2	− 145,3

Tabelle 103. *Flüssige Oxidatoren.*

Die mit verschiedenen Kombinationen von Brennstoff und Oxidator erreichten spezifischen Impulse ergeben sich aus der Tabelle 104.

Brennstoff	Spezifische Impulse I_S (m/s)				
	O_2	F_2	OF_2	HNO_3	N_2O_4
Wasserstoff	3830	4020	4020	—	—
Kerosin RP—1	2950	3200	3420	2580	2710
Hydrazin	3070	3570	3380	2730	2850
MMH	3060	3390	3420	2740	2820
UDMH	3040	3360	3440	2710	2800
Aerozin	3060	—	—	2740	2820
Hydyne	—	—	3410	—	—
Diboran	3370	3640	—	—	—
Pentaboran	3140	3530	3530	—	2970
Ammoniak	2890	3520	3300	—	2640
Äthylalkohol	2810	3240	—	—	—

* Die eingeklammerten Werte beziehen sich auf rotrauchende Salpetersäure HNO_3+15%NO_2.

Tabelle 104. *Spezifische Impulse von Brennstoff/Oxidator-Kombinationen.*

Aus der Tabelle 104 ist zu erkennen, daß mit Fluor, Sauerstoff und Sauerstoffdifluorid als Oxidatoren die größten spezifischen Impulse erreicht werden, während die spezifischen Impulse mit Salpetersäure und Distickstofftetroxid wesentlich niedriger liegen. Der höchste für solche Systeme in der Literatur angegebene spezifische Impuls liegt bei 4480 m/s für das System H_2 – Be/O_2.

Die während des Zweiten Weltkrieges in Peenemünde von Wernher von Braun entwickelte A 4 (V2) verwendete als Treibstoff die Kombination Äthylalkohol (75 %)/O_2 (fl). Die Treibstoffpumpen wurden mit Wasserstoffperoxid angetrieben. Die amerikanische Mondrakete Saturn 5 verwendet in den Triebwerken F 1 der 1. Stufe die Treibstoffkombination Kerosin/O_2 (fl) und in den Triebwerken I_2 der 2. und 3. Stufe H_2 (fl)/O_2 (fl).

Diese Treibstoffkombinationen bezeichnet man als Kryogene, weil zumindest eine Komponente nur bei tiefen Temperaturen als Flüssigkeit vorliegt (s. Tabellen 102 und 103). Treibstoffkombinationen, die bei Raumtemperatur in flüssigem Aggregatzustand vorliegen, werden lagerfähig (storable) genannt. Lagerfähige Treibstoffkombinationen haben insbesondere für mittlere militärische Raketen Bedeutung, die nicht erst vor dem Einsatz aufgetankt werden sollen, sondern bei denen die aufgetankte Rakete ohne Versorgungssystem sofort einsatzbereit ist

(pre-package). Hier liegt die besondere Bedeutung von Salpetersäure/Stickoxid-Mischungen als Oxidator.

Hinsichtlich der Zusammenstellung von Treibstoffkombinationen ist das Zündverhalten von großer Wichtigkeit. Eine Reihe von Oxidatoren und Brennstoffen entzünden sich bei Kontakten spontan; dieses Verhalten wird als *Hypergolität* bezeichnet. Teilweise können hypergole Kombinationen auch durch Zugabe von Katalysatoren entstehen.

In der Tabelle 105 ist das Zündverhalten verschiedener Treibstoffkombinationen zusammenstellt.

○ = hypergol □ = hypergol mit Katalysator X = nichthypergol

Oxidator / Brennstoff	O_2 fl.	F_2 fl.	H_2O_2	HNO_3	N_2O_4	ClF_3
Ammoniak	X	○	X	□	□	○
Anilin	X	○	X	□	○	○
Äthanol	X	○	□	X	X	○
Hydrazin	X	○	□	○	○	○
Kerosin RP−1	X	○	X	X	X	○
H_2 fl.	X	○	X	X	X	○
MMH	X	○	X	○	○	○
UDMH	X	○	X	○	○	○

Tabelle 105. *Zündverhalten von Treibstoffkombinationen.*

Nichthypergole Kombinationen werden entweder pyrotechnisch oder durch einen hypergolen „Vorlauf" gezündet.

1.3.2.2. Festtreibstoffe

Man unterscheidet

homogene Treibstoffe, bei denen der Sauerstoff und der Brennstoff in einer Verbindung enthalten sind,

und

heterogene Treibstoffe oder „Composite", die aus einem Gemisch zumindest zweier Verbindungen, dem Brennstoff und dem Oxidator, bestehen.

Die *homogenen* Treibstoffe sind auf der Basis der Nitrocellulose aufgebaut, die mit Diglykolnitrat oder Nitroglycerin gelatiniert ist (s. zweibasige Pulver, 1.3.1.2.1.); hauptsächlich wird Nitroglycerin als

zweite Komponente verwendet. Ferner enthalten die homogenen Treibstoffe Zusätze zur Stabilisierung und zur leichteren Verarbeitung, wie teilweise von den Geschützpulvern her bekannt ist. Ihre Herstellung erfolgt ebenfalls ähnlich den entsprechenden Geschützpulvern. Die endgültige Form wird durch Strangpressen in geheizten Extrudern, Nachbearbeiten und Isolieren erzeugt.

Beim *heterogenen* Festtreibstoff ist der (feinkristalline) Oxidator in einem Kunststoffbinder gleichmäßig verteilt.

Als Oxidatoren werden folgende Nitrate und Perchlorate verwendet:

Lithiumnitrat	$LiNO_3$
Natirumnitrat	$NaNO_3$
Kaliumnitrat	KNO_3
Ammoniumnitrat	NH_4NO_3
Lithiumperchlorat	$LiClO_4$
Natriumperchlorat	$NaClO_4$
Kaliumperchlorat	$KClO_4$
Ammoniumperchlorat	NH_4ClO_4

Der Sauerstoffüberschuß dieser Verbindungen rangiert zwischen 20 Gewichtsprozent beim Ammoniumnitrat und 60 Gewichtsprozent beim Lithiumperchlorat. Neuerdings wird auch die Verwendung von Nitroniumperchlorat (NO_2ClO_4) mit 66 Gewichtsprozent Sauerstoffüberschuß studiert.

Ammoniumnitrat als Oxidator führt zu einem gasreichen Treibstoff mit vergleichsweise geringer Verbrennungstemperatur. Die lineare Abbrandgeschwindigkeit ist gering, ebenso der spezifische Impuls.

Kaliumperchlorat führt ebenso zu einem geringen spezifischen Impuls, jedoch ist die lineare Abbrandgeschwindigkeit sehr hoch, so daß sich Kaliumperchlorat-Composite für Starttriebwerke gut eignen.

Ammoniumperchlorat liefert vergleichsweise hohe spezifische Impulse bis zu 2450 m/s. Die lineare Abbrandgeschwindigkeit liegt im mittleren Bereich, wobei die Druck- und Temperaturabhängigkeit geringer ist als bei anderen Oxidatoren

Als Binder werden eingesetzt:

Asphalt (mit $KClO_4$ für Starthilferaketen); Asphaltcomposite haben geringe Leistung und sind nicht formstabil.

Polyisobutylen (mit Ammoniumperchlorat); es hat eine höhere Leistung, aber keine Formstabilität.

Polyvinylchlorid (mit Ammoniumperchlorat); es hat eine hohe Leistung; wegen großer Schrumpfung ist eine Gehäusebindung (case bonding) nur bei kleinen Abmessungen möglich.

Celluloseacetat (mit Ammoniumnitrat); es entwickelt große Gasmengen mit geringer Temperatur, daher zur Verwendung in Gasgeneratoren geeignet.

Polysulfid (mit Ammoniumperchlorat); da ein großer Füllgrad (80 %) möglich ist, ergibt sich eine hohe Leistung; es ist gummielastisch. Polysulfid-Composite werden auch als Thiokole bezeichnet.

Polyurethan (mit Ammoniumperchlorat) hat eine sehr hohe Leistung.

Polybutadien – Acrylsäure-Polymere besitzen eine sehr hohe Leistung und gute physikalische Eigenschaften.

Treibstoffe mit Polyvenylchlorid (PVC) und Celluloseacetat werden auch als *Plastisole* bezeichnet.

Zur weiteren Erhöhung des spezifischen Impulses werden den Festtreibstoffen Leichtmetallpulver (Al, Mg) oder Bor bzw. Metallhydride zugegeben.

Zur Beeinflussung der linearen Abbrandgeschwindigkeit fügt man als *ballistische Zusätze* Katalysatoren wie Kupfer- oder Chromoxid zu (Plateau- und Mesaeffekt).

Die Abbrandgeschwindigkeit von heterogenen Festtreibstoffen wird durch die Korngröße der Oxidatoren entscheidend beeinflußt.

Die Composite werden nach dem Gieß- oder Preßverfahren zu Treibsätzen verarbeitet, die dann nach teilweiser *Isolation* der Oberfläche in die Brennkammern eingesetzt werden. Sie können aber auch direkt in die Brennkammern eingegossen werden, wobei man bei Innenbrennern eine Kernmatrize verwendet, die nach dem Abbinden des Treibstoffes herausgezogen wird.

1.3.2.3. Lithergole

Bei lithergolen Antrieben, die auch als Hybridsysteme bezeichnet werden, finden als *flüssige Oxidatoren* Sauerstoff, Wasserstoffperoxid, Distickstofftetraoxid, Salpetersäure, Chlortrifluorid und Sauerstoffdifluorid Verwendung.

Als *feste Brennstoffe* werden vor allem Kohlenwasserstoffe $[(CH_2)_n]$, z.T. mit Leichtmetallzusätzen eingesetzt.

Die besonderen Probleme der lithergolen Antriebe liegen in der Abstimmung der Strömungsverhältnisse in der Brennkammer, da der Oxidator über die Oberfläche des festen Brennstoffes hinwegströmt und dabei eine optimale Umsetzung erreicht werden soll.

1.3.3. Thermochemie

Die bei der Umsetzung eines Pulvers entstehende Explosionswärme, Explosionstemperatur, Schwadenzusammensetzung und das Gasvolumen lassen sich mit Hilfe der Methoden der Thermochemie prinzipiell beliebig genau berechnen. Die grundsätzlichen Überlegungen hierzu seien im folgenden kurz umrissen:

Bei der Umsetzung eines Nc- oder POL-Pulvers der Bruttoformel $C_aH_bN_cO_d$ entstehen vornehmlich die Umsetzungsprodukte CO_2, CO, H_2O, H_2 und N_2.

Daneben treten Radikale wie H, OH, NO u.a. in verschiedenen Anregungszuständen auf. Nachreaktionen in Schwaden können insbesondere bei den „kalten" Pulvern zur Entstehung von C, NH_3 und CH_4 führen.

Die Berechnung geht zunächst von den fünf Hauptreaktionsprodukten aus [9].

Zwischen CO_2, CO, H_2O und H_2 ist eine Austauschreaktion bekannt, die Wassergasreaktion:

$$CO_2 + H_2 \leftrightarrows CO + H_2O.$$

Die Konzentration [ ] oder der Partialdruck der an der Wassergasreaktion beteiligten Reaktionspartner wird durch das Massenwirkungsgesetz kontrolliert:

$$\frac{[CO]\,[H_2O]}{[CO_2]\,[H_2]} = k\,(T). \qquad (1)$$

k(T) ist eine nur von der Temperatur T abhängige Größe, die für das Wassergasgleichgewicht tabelliert vorliegt.

Außerdem sind die Molzahlen der Atome des Treibstoffes mit der Bruttozusammensetzung $C_aH_bN_cO_d$ und der Reaktionsprodukte gleich:

$$[C]: \quad [CO] + [CO_2] = a, \qquad (2)$$

$$[H]: \quad 2\,[H_2O] + 2\,[H_2] = b, \qquad (3)$$

$$[O]: \quad [CO] + 2\,[CO_2] + [H_2O] = d. \qquad (4)$$

Die Gleichungen (1) bis (4) stellen ein Gleichungssystem mit den molaren Konzentrationen der vier Reaktionspartner dar, das sich mit k(T) als temperaturabhängiger Größe lösen läßt, wobei hier $T = T_{ex}$ die Explosionstemperatur ist.

Die Explosionstemperatur ist nun selbst wieder von der Lösung des Systems nach Gleichungen (1) bis (4) abhängig. Es gilt nämlich für T_{ex}:

$$Q_{ex} = Q_{BG} - Q_{BP} = \bar{c}_{vG} T_{ex} - c_{vP} T_0. \quad (5)$$

Darin bedeuten:

Q_{ex}	=	Explosionswärme,
Q_{BG}	=	Bildungswärme der Pulvergase,
Q_{BP}	=	Bildungswärme des Pulvers,
c_{vP}	=	spezifische Wärme des Pulvers,
T_0	=	Umgebungstemperatur des unverbrannten Pulvers.

$\bar{c}_{vG}$ ist die mittlere spezifische Wärme der Pulvergase:

$$\bar{c}_{vG} = \frac{\sum_i p_i c_{vGi}}{\sum_i p_i}, \quad (6)$$

wobei p_i die Partialdrücke und c_{vGi} die molaren Wärmen der Reaktionsprodukte (hier CO_2, CO, H_2O, H_2 und N_2) bedeuten.

Die Werte von c_{vGi} sind auch wieder temperaturabhängig; sie liegen ebenfalls in tabellierter Form für eine große Zahl von Gasen vor.

Die Bildungswärme der Pulvergase berechnet sich aus den Konzentrationen der einzelnen im Gas enthaltenen Moleküle und deren Bildungswärmen, die auch tabelliert sind.

In der Praxis kann man die Berechnung so durchführen, daß man zunächst das Gleichungssystem nach Gleichungen (1) bis (4) mit einer geschätzten Temperatur löst und die Lösung mit Hilfe von Gleichung (5) überprüft, um dann mit einem verbesserten Wert die Rechnung zu wiederholen, bis die Bedingung

$$Q_{BG} - Q_{BP} = Q_{ex} \quad (7)$$

erfüllt ist. Das Gasvolumen ergibt sich sofort aus der Gesamtmolzahl der gasförmigen Reaktionsprodukte.

Da das Auftreten von weiteren von der Explosionstemperatur abhängigen Reaktionsprodukten auch bekannt ist, kann die Rechnung durch Berücksichtigung dieser Komponenten weiter korrigiert werden.

Für eine eingehendere Darstellung der thermochemischen Berechnungsverfahren für Pulver bzw. Raketentreibstoffe wird auf die unter [4], [9], [10] und [11] angegebene Literatur verwiesen.

1.3.4. Das Abbrandverhalten der Pulver

Die Umsetzung von Treibstoffen ist ein außerordentlich komplexer physikalisch-chemischer Vorgang, dessen auch nur annähernd vollständige Darstellung den hier vorgegebenen Rahmen sprengen würde. Für ein eingehendes Studium werden u.a. insbesondere die in der Literatur unter [4] und [9] genannten Bücher empfohlen, worin alle wichtigen experimentellen und theoretischen Arbeiten auf diesem Gebiet behandelt werden.

Wie im Kapitel 2, Innere Ballistik, dargestellt, bestimmt das Abbrandverhalten eines Treibstoffs in entscheidender Weise den Antriebsvorgang bei einem Projektil. Bei Raketentriebwerken, die mit Flüssigtreibstoffen oder mit Lithergolen arbeiten, wird die Erzeugung der heißen Verbrennungsgase, also der Abbrand, durch die Förderungsrate der Einspritzpumpen bestimmt; sie kann damit während des Antriebsvorganges geregelt werden. Bei Pulvern für Feststoffraketen oder für Rohrwaffen dagegen ist der Abbrandverlauf durch die Pulvergeometrie und die übrige innenballistische Auslegung festgelegt.

Für Treibsätze, die homogen oder heterogen in einer Mischung vorliegen, wird die Umsetzungsrate durch die gesamte freie Oberfläche und den thermodynamischen Zustand der Gasphase im Verbrennungsraum bestimmt.

Die Umsetzungsrate $\frac{dz}{dt}$ setzt sich aus der zur Zeit t freien Oberfläche des Treibstoffs S(t), seiner Dichte ρ_c und der linearen Verbrennungsgeschwindigkeit $\frac{de}{dt}$ zusammen.

Wird der Anteil der verbrannten Ladung durch

$$z = \frac{m_{ca} - m_c(t)}{m_{ca}} \qquad (8)$$

definiert, worin m_{ca} der anfangs vorhandene und $m_c(t)$ der zur Zeit t unverbrannte Treibstoff bedeutet, dann ist

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{1}{m_{ca}}\frac{dm_c(t)}{dt}. \qquad (9)$$

Außerdem gilt

$$-\frac{dm_c(t)}{dt} = \rho_c S(t)\frac{de}{dt}, \qquad (10)$$

weil in der Zeiteinheit die Pulverschicht de/dt auf der gesamten momentanen Oberfläche S(t) abbrennt; damit ist das verbrannte Treibstoffvolumen S(t) de/dt, das, mit der Dichte ρ_c des Treibstoffs multipliziert, zu der je Zeiteinheit verbrannten Treibstoffmasse dm_c/dt führt.

Da für den Verlauf des Abbrands eines Treibstoffs der Anteil der verbrannten Ladung z in eindeutiger Weise von der Zeit t abhängt, läßt

sich statt der Variablen t als unabhängige Variable auch z einführen, so daß anstatt S(t) auch S(z) geschrieben werden kann.

Dann ergibt sich aus den Gleichungen (9) und (10)

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\rho_c S(t)}{m_{ca}} \frac{de}{dt}. \qquad (11)$$

Gleichung (11) ist die Ausgangsgleichung für das in der inneren Ballistik verwendete Abbrandgesetz. Der Quotient ρ_c S(t)/m_{ca} stellt bis auf einem im allgemeinen konstanten Faktor die Formfunktion dar, die im Kap. 2, Innere Ballistik, näher behandelt wird. Im folgenden soll auf die lineare Verbrennungsgeschwindigkeit eingegangen werden: Stark vereinfacht lassen sich die Vorgänge an der abbrennenden Pulveroberfläche in drei Bereiche aufteilen, die in Bild 103 dargestellt sind.

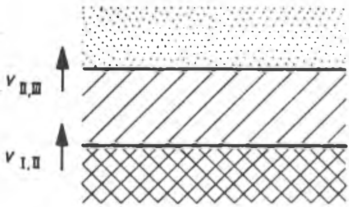


Bild 103. *Reaktionszonen beim Pulverabbrand.*

Der Übergang vom festen oder flüssigen Treibstoff in die gasförmige Reaktionszone sei durch die Reaktionsgeschwindigkeit $v_{I,II}$ charakterisiert; der Übergang von der gasförmigen Reaktionszone in den Gasraum, wo die Reaktionen abgeschlossen sind, soll mit der Reaktionsgeschwindigkeit $v_{II,III}$ ablaufen.

Die Reaktionsgeschwindigkeit $v_{I,II}$ ist durch den Wärmeübergang durch Konvektion und Strahlung auf die Treibstoffoberfläche sowie die Anregungsenergie bestimmt, die z. B. bei der Nitrocellulose zur Pyrolyse der Makromoleküle, bei Composittreibstoffen zum Verdampfen bzw. Zersetzen des anorganischen Sauerstoffträgers erforderlich ist. Das Zersetzen des Binders bei Compositen ist im allgemeinen nicht geschwindigkeitsbestimmend.

Die Reaktionsgeschwindigkeit $v_{II,III}$ ist von der chemischen Zusammensetzung der Zwischenprodukte abhängig. Die Reaktionen in der Zone II laufen nach komplizierten Radikalmechanismen ab. Wenn die Reaktion nach der ersten Ordnung verläuft, gilt

$$v_{II,III} \sim p^{\frac{1}{2}}. \qquad (12)$$

Ist eine Reaktion zweiter Ordnung geschwindigkeitsbestimmend, so ist zu erwarten, daß die Reaktionsgeschwindigkeit $v_{II,III}$ dem Druck in der Gasphase direkt proportional ist:

$$v_{II,III} \sim p. \tag{13}$$

Man kann die Theorien zur linearen Verbrennungsgeschwindigkeit in zwei Gruppen einteilen:

$$v_{I,II} < v_{II,III} : \text{Oberflächentheorien,}$$

$$v_{I,II} > v_{II,III} : \text{Gasphasentheorien.}$$

Das heißt: Bei den Oberflächentheorien geht man davon aus, daß die Wärmeübertragung auf die Treibstoffoberfläche der langsamste und damit der den Abbrand kontrollierende Schritt ist. Bei der Gasphasentheorie bestimmen die Reaktionen in der Zone II den Abbrand.

Als Vertreter für die Oberflächentheorie seien MURAOUR-AUNIS |12| genannt, die den halbempirischen Ansatz

$$\frac{de}{dt} = \text{const}\; e^{-\frac{E_0}{kT_{ex}}}\, p + a \tag{14}$$

angeben mit

E_0 = Anregungsenergie für ein Molekül,
T_{ex} = Explosionstemperatur,
p = Gasdruck
k = Boltzmannsche Konstante und
a = Beitrag der Wärmestrahlung.

Der Betrag der Größe a ist derart, daß er bei höheren Drücken (ungefähr oberhalb 1000 bar) gegenüber dem ersten Summanden in Gleichung (14), der proportional mit dem Druck zunimmt, vernachlässigt werden kann.

In abgekürzter Form wird das Abbrandgesetz nach MURAOUR-AUNIS als

$$\frac{de}{dt} = a + b\,p \tag{15}$$

geschrieben.

Für Nitroglycerinpulver mit Centralit fanden MURAOUR und AUNIS entsprechend Gleichung (14)

$$\log b = c_1 + c_2 T_{ex} \tag{16}$$

für einen großen Bereich von Nitroglycerin-Konzentrationen, der $2000\ K \leqslant T_{ex} \leqslant 4000\ K$ entspricht, bestätigt. Daraus muß die Unabhängigkeit der Anregungsenergie E_0 vom Nitroglyceringehalt bei diesem Pulvertyp gefolgert werden.

Die in der gasförmigen Reaktionszone zu erwartende Reaktionsordnung ist bevorzugt die Ordnung 1. Daher führen die Gasphasentheorien im allgemeinen zu

$$\frac{de}{dt} \sim p^{\frac{1}{2}}, \tag{17}$$

jedoch hängt die Reaktionsordnung und auch der Übergang vom Gasphasenmechanismus zum Oberflächenmechanismus stark vom Druck ab. So gibt CORNER [9] für ein nicht näher bezeichnetes Raketenpulver die in der Tabelle 106 genannte Druckabhängigkeit der Exponenten α im VIEILLEschen Abbrandgesetz

$$\frac{de}{dt} = \beta p^{\alpha} \tag{18}$$

an.

p (bar)	α
130	0,5
1500	0,96

Tabelle 106. *Druckabhängigkeit des Vieilleschen Exponenten* α.

Dabei ändert sich α für die Zwischenwerte des Druckes monoton.

Die für praktische Rechnungen gebräuchlichen Ansätze für die lineare Verbrennungsgeschwindigkeit sind im Kap. 2, Innere Ballistik, zusammengestellt.

Hier sei abschließend erwähnt, daß einerseits bei Gasdrücken, wie sie in Rohrwaffen auftreten, die lineare Verbrennungsgeschwindigkeit in guter Näherung als druckproportional angesetzt werden kann, andererseits ein stationärer Zustand in einem Feststoffraketenmotor nur möglich ist, wenn die lineare Verbrennungsgeschwindigkeit nicht einfach proportional vom Druck abhängt [13]. Tatsächlich wird beim Arbeitsdruck üblicher Raketenmotoren eine dem Druck proportionale lineare Verbrennungsgeschwindigkeit noch nicht erreicht, was auch Tabelle 106 zeigt.

1.3.5. Prüfmethoden für Pulver

Die Prüfung von Geschützpulvern und Raketentreibstoffen, die stichprobenweise an jedem Fertigungslos vorgenommen wird, bezieht sich auf

die chemische Zusammensetzung,
die chemische Stabilität,
die physikalischen Eigenschaften und
das ballistische Verhalten.

Die *chemische Zusammensetzung* [14] wird mit den üblichen Analysenmethoden festgestellt, zu denen heute auch moderne Verfahren wie die Dünnschichtchromatographie u.ä. gehören.

Die technischen Lieferbedingungen schreiben hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung im allgemeinen das Messen des Gesamtgehaltes an flüchtigen Bestandteilen (Restlösungsmittel), der Pulverfeuchtigkeit (Exsikkator- oder Destillationsmethode), der Gehalte an unvergasbaren und an ätherlöslichen Bestandteilen vor.

Da insbesondere Nitrocellulose und Nitroglycerin als Salpetersäureester zur autokatalytischen Säureabspaltung neigen, sind *Stabilitätstests* erforderlich, bei denen die Abspaltung durch erhöhte Temperatur beschleunigt wird. Man unterscheidet zwischen Tests, die bei stark erhöhter Temperatur über Stunden bis Tage laufen, und Lebensdauertests, die bei wenig erhöhter Temperatur über Jahre ausgedehnt werden können. Als zuverlässigste Prüfung gilt der Holland-Test, durch den bei + 105°C über 150 Stunden oder bei + 110°C über 72 Stunden der Gewichtsverlust des Pulvers laufend registriert wird. Daneben sind der Abel-Test, der Bergmann-Junk-Test und der Hansen-Test die wichtigsten Teste. Einzelheiten darüber finden sich bei KAST und METZ [14].

Als Lebensdauertest wird die Warmlagermethode angewendet, bei der im allgemeinen bei + 75°C beobachtet wird, wann gelbrote oder rotbraune Dämpfe auftreten.

Zu den Prüfungen *der physikalischen Eigenschaften* eines Pulvers gehören die Kontrollen von Form und Abmessungen, der Dichte, des Schüttgewichts (sofern gegeben), der Druckfestigkeit, der Verpuffungstemperatur, der Explosionswärme und der Hygroskopizität.

Die Verpuffungstemperatur wird bei Nitrocellulose- und Nitroglycerinpulvern dadurch festgestellt, daß man eine Probe in einem Paraffinbad mit 5°C/min aufheizt und beobachtet, bei welcher Temperatur sie sich entzündet und verpufft.

Die Explosionswärme wird in der kalorimetrischen Bombe gemessen. Bei diesem Meßverfahren wird die Pulverprobe in einem geschlossenen Druckgefäß (bis 2000 bar) gezündet, das in eine Kalorimeterflüssig-

keit eingetaucht ist. Bei der Pulverumsetzung führt die Wärmetönung zu einer Temperaturerhöhung der Kalorimeterflüssigkeit (Wasser), die gemessen wird; unter Berücksichtigung des Wasserwertes des Kalorimeters und des Druckgefäßes kann, dann die Explosionswärme berechnet werden. Sinnvollerweise wird die Siedetemperatur des Wassers als Kalorimeterflüssigkeit nicht überschritten; d.h.: das bei der Verbrennung entstandene Wasser liegt auch kondensiert vor; es wird der obere Heizwert gemessen.

Die besondere Problematik der Bestimmung der Explosionswärme in der Kalorimeterbombe liegt darin, daß sich bei der niedrigen Endtemperatur der Kalorimetermessung ein anderes chemisches Gleichgewicht in den Schwaden einstellt als bei der Explosionstemperatur; damit ist auch die Wärmetönung anders.

Die Überprüfung des *ballistischen Verhaltens* von Geschützpulvern erfolgt üblicherweise durch Probeschüsse aus der Waffe mit wohldefinierten Munitionskomponenten. Dabei wird zunächst das der geforderten ballistischen Leistung entsprechende Ladungsgewicht ermittelt. Dann wird mit einer größeren Zahl von Schüssen aus einer Pulverprobe

der Mittelwert der Mündungsgeschwindigkeit des Geschosses und dessen Streuung,

der Mittelwert des Gasdruckes (im allgemeinen mit Stauchkörpern gemessen) und der höchste aufgetretene Gasdruck sowie

die Ladefähigkeit

festgestellt.

Für Pulverentwicklungen, z.T. aber auch bei der Fertigungsüberwachung, wird mit großem Nutzen die manometrische Bombe zur Feststellung der ballistischen Werte benutzt. Dabei handelt es sich um ein geschlossenes Druckgefäß, in dem das Pulver bei konstantem geometrischem Verbrennungsraum umgesetzt wird. Bild 104 zeigt schematisch den Aufbau einer solchen manometrischen Bombe.

Beim Arbeitsablauf mit der manometrischen Bombe wird zunächst bei geschlossenem Ventil 4 und entferntem Verschluß 2b die Pulverladung eingebracht; dann wird der Verschluß 2b eingeschraubt, an dem zuvor eine elektrische Zündpille mit einer Anfeuerungsladung über die Spannungszuführung 5 befestigt wurde. Wenn das Gefäß geschlossen ist, wird gezündet und der Druckanstieg über der Zeit mit Hilfe des Gebers 6 registriert. Nach Beendigung der Messung werden die Pulvergase über das Ventil 4 abgelassen.

Einen charakteristischen Druckverlauf in der manometrischen Bombe zeigt das Bild 105.

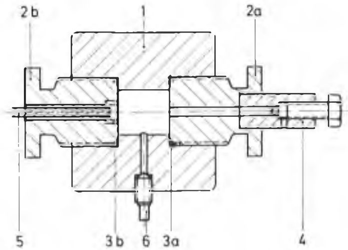


Bild 104. *Manometrische Bombe.*

1 Gefäßkörper; 2a und 2b stirnseitige Verschlüsse; 3a und 3b Dichtungen; 4 Ablaßventil; 5 isolierte Spannungszuführung für elektrische Zündpille; 6 piezoelektrischer Druckgeber.

Man erkennt zunächst einen zunehmend steiler werdenden Druckanstieg über der Zeit, der dann in einen horizontalen Verlauf übergeht. In diesem Übergangspunkt ist das Pulver vollständig verbrannt. Bei genauerem Hinsehen erkennt man, daß der Druck nach dem Brennschluß nicht horizontal verläuft, sondern wegen der Abkühlung der Pulvergase langsam abnimmt.

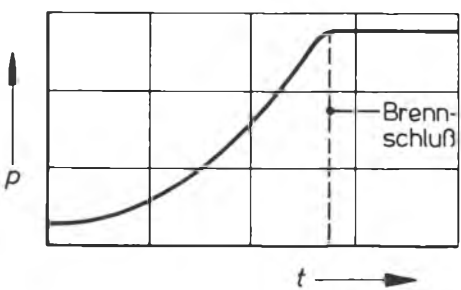


Bild 105. *Charakteristischer Druckverlauf in der manometrischen Bombe.*

Für den nach Brennschluß erreichten maximalen Gasdruck p_m in der manometrischen Bombe gilt die Abelsche Gleichung

$$p_m = \frac{f m_c}{V_B - \eta m_c}, \tag{19}$$

worin f die Pulverkonstante, m_c die Pulvermasse, V_B den geometrischen Verbrennungsraum und η das Kovolumen bedeuten.

Mit der Ladedichte

$$\Delta = \frac{m_c}{V_B} \tag{20}$$

wird daraus

$$p_m = \frac{f}{\frac{1}{\Delta} - \eta}. \tag{21}$$

Wenn man für mindestens zwei Ladedichten den maximalen Gasdruck mißt, lassen sich die Pulverparameter f und η bestimmen. Um für f und η einen zuverlässigen Mittelwert zu erhalten, führt man die Messung bei wesentlich mehr Werten für die Ladedichte aus, als nach Gleichung (21) erforderlich.

Die Auswertung erfolgt dann anhand der umgeformten Gleichung (21):

$$\frac{1}{p_m} = \frac{1}{f}\frac{1}{\Delta} - \frac{\eta}{f}. \tag{21a}$$

Trägt man aus den i Messungen $\frac{1}{p_{mi}}$ über $\frac{1}{\Delta_i}$ auf, so erhält man als Ausgleichskurve eine Gerade (Bild 106).

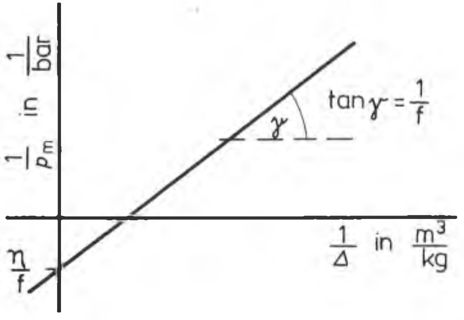


Bild 106. *Auswertung der Meßergebnisse aus der manometrischen Bombe.*

Aus der Steigung der Geraden wird die Pulverkonstante f und aus dem negativen Ordinatenabschnitt das Kovolumen η bestimmt.

Neben f und η kann aus den Druckkurven der manometrischen Bombe auch die Abbrandgeschwindigkeit dz/dt berechnet werden.

Während des Abbrands gilt für den Gasdruck die Beziehung

$$p(t) = \frac{f m_c z(t)}{V_B - \eta m_c z(t) - \frac{1}{\rho_c} m_c (1 - z(t))} \qquad (22)$$

mit z(t) als Anteil der umgesetzten Ladung und ρ_c als Pulverdichte.

Wenn man voraussetzt, daß $\eta = \frac{1}{\rho_c}$ gilt, wird aus Gleichung (22):

$$p(t) = \frac{f m_c}{V_B - \eta m_c} z(t) \qquad (23)$$

oder mit Gleichung (19)

$$p(t) = p_m z(t) . \qquad (24)$$

Leitet man Gleichung (24) einmal nach der Zeit ab, dann erhält man

$$\dot{p}(t) = p_m \dot{z}(t) . \qquad (25)$$

Da der Pulverabbrand in allgemeiner Form durch

$$\dot{z}(t) = B_a \varphi(z) \frac{p(t)}{p_o} \qquad (26)$$

beschrieben werden kann (s. Abschnitt 2.1.5.3, Der Pulverabbrand) – mit B_a als Abbrandkoeffizient und $\varphi(z)$ als Formfunktion –, gilt mit Gleichung (25)

$$\frac{B_a \varphi(z)}{p_o} = \frac{\dot{p}(t)}{p_m p(t)} ; \qquad (27)$$

damit ist das Abbrandverhalten des Pulvers bekannt. Der Quotient $\frac{\dot{p}}{p_m p}$ wird auch als dynamische Lebhaftigkeit L bezeichnet.

Die Berechnung von $B_a \varphi(z)$ läßt sich auch für den allgemeinen Fall $\eta \neq \frac{1}{\rho_c}$ durchführen, nur werden die Beziehungen dann komplizierter.

Im Zusammenhang mit der manometrischen Bombe sei abschließend erwähnt, daß entsprechend Gleichung (26) die Integration der Druckkurve bis zum Zeitpunkt t_b des Brennschlusses

$$\int_0^{t_b} p(t)\, dt = \int_0^1 \frac{p_0\, dz}{B_a\, \varphi(z)} \qquad (28)$$

zu einem Wert führen muß, der wegen der rechten Seite von Gleichung (28) bei einem durch $B_a \varphi(z)$ charakterisierten Pulver unabhängig von der Ladedichte ist, bei der die Druckkurve aufgenommen wurde. Hierzu wurden von O. SCHMITZ [15] an Geschützpulvern in dem dafür interessanten Druckbereich umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, die die obige Aussage und damit den Ansatz für das Abbrandgesetz nach Gleichung (26) bestätigen. In die Literatur ist dieser Zusammenhang als Krupp-Schmitzsches Gesetz eingegangen.

Zur Messung des Abbrandverhaltens von Raketenpulvern verwendet man die Crawford-Bombe oder die Normbrennkammer, die in neuerer Zeit auch zur Untersuchung von Treibladungspulvern eingesetzt wird, die im allgemeinen bei höheren Drücken abbrennen.

In der Crawford-Bombe wird ein Probekörper des Treibstoffs bei konstant gehaltenem Stickstoffdruck abgebrannt. Der Probekörper ist 150 bis 200 mm lang bei einem Durchmesser von 3 bis 5 mm; er ist auf seiner Mantelfläche und einer Stirnfläche durch einen Kunststoff-Film isoliert, so daß er als Stirnbrenner abbrennt. An zwei definierten Stellen sind quer durch den Probekörper Schmelzdrähte gezogen, die sich trennen, wenn die Abbrandzone über sie hinweggeht, und dadurch ein Zählgerät triggern. Auf diese Weise wird die Zeit festgestellt, die bis zum Zurücklegen einer gewissen Strecke durch die Abbrandzone vergeht, woraus sich die lineare Verbrennungsgeschwindigkeit direkt berechnen läßt.

Die Crawford-Bombe ist so dimensioniert, daß der eingestellte Stickstoffdruck durch die entstehenden Pulvergase praktisch nicht erhöht wird; man kann die Messung also als isobar ansehen. Die Druckabhängigkeit der linearen Verbrennungsgeschwindigkeit erhält man dadurch, daß Crawford-Messungen bei verschieden eingestellten Drücken durchgeführt werden.

1.4. Sprengstoffe [8], [16]

Wie in Abschnitt 1. bereits ausgeführt, besteht bei explosiven Stoffen kein prinzipieller Unterschied zwischen Treibstoffen und Sprengstoffen. Je nach der Art der Zündung kann man im allgemeinen erreichen, daß ein explosiver Stoff entweder wie ein Treibstoff abbrennt (s. 1.3.4 , Das Abbrandverhalten) oder daß er detoniert. Beim Abbrand ist die Umsetzung vom Druck und der Temperatur der Gasphase abhängig; die lineare Abbrandgeschwindigkeit hat Werte zwischen 10^{-4} und 1 m/s. Bei der Detonation verläuft die Umsetzung als stationärer Vorgang mit konstanter Geschwindigkeit, der Detonationsgeschwindigkeit, deren Werte je nach der chemischen Zusammensetzung des explosiven Stoffes

und dessen Ladedichte zwischen $2 \cdot 10^3$ und $8 \cdot 10^3$ m/s liegen. Einzelheiten zu den physikalischen und chemischen Vorgängen bei der Detonation werden unter 1.4.5 erläutert.

Die Eignung eines explosiven Stoffes als Sprengstoff richtet sich nun nach Forderungen an bestimmte Eigenschaften, die sich aus seiner unterschiedlichen Anwendung ergeben. So unterscheidet man zwischen *militärischen* und *zivilen* sowie *Initialsprengstoffen.*

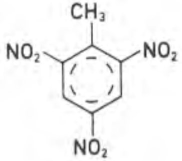
1.4.1. Militärische Sprengstoffe

An militärische Sprengstoffe werden insbesondere folgende Forderungen gestellt:

- hohe Energiedichte,
- Abschußsicherheit, d.h. Druckfestigkeit je nach Höhe der Sprengstoffsäule bis zu einigen zehntausend „g",
- Handhabungssicherheit,
- Laborierfähigkeit (Gießen oder Pressen),
- chemische Beständigkeit, auch bei langen Lagerzeiten.

Nachfolgend sind die wichtigsten chemischen Verbindungen, die die genannten Forderungen erfüllen, mit ihren Eigenschaften zusammengestellt. Alle diese Stoffe liegen im Bereich der Anwendungstemperaturen im festen Aggregatzustand vor.

Trinitrotoluol 2, 4, 6 (TNT, Tri, Tritol, Trilite, Tolit, Tutol, Trinol, Triton, Trotyl)

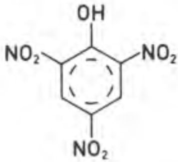


Dichte: 1,64 g/cm^3
Schmelzpunkt: 80,8°C
Explosionswärme: 4310 kJ/kg (H_2O dampfförmig)
Detonationsgeschwindigkeit: 6900 m/s
Verpuffungstemperatur: 300°C

Trinitrotoluol liegt in Form von gelblichen Kristallen vor; es ist in Wasser nahezu unlöslich, in Alkohol schwach löslich, jedoch löst es sich gut in Benzol, Toluol und Aceton. Es ist chemisch sehr stabil und greift Metalle nicht an.

Aufgrund seines günstigen Schmelzpunktes ist Trinitrotoluol heute einer der am weitesten verbreiteten militärischen Sprengstoffe; es wird in reiner Form oder mit anderen Sprengstoffen gemischt als Schmelze in Sprengstoffwirkteile von Waffen aller Art laboriert. Wegen einer negativen Volumenänderung von 12 % beim Übergang von der flüssigen in die feste Phase sind allerdings besondere Maßnahmen zu treffen, um einen lunkerfreien Guß zu erzielen. Aufgrund seiner geringen mechanischen Empfindlichkeit eignet sich TNT auch gut zum Pressen von Ladungen.

Pikrinsäure (2,4,6 Trinitrophenol, Pertit, Pikrinit, Melinit, Ekrasit)

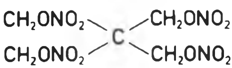


Dichte: 1,75 g/cm^3
Schmelzpunkt: 122,5°C
Explosionswärme: 4350 kJ/kg
(H_2O dampfförmig)
Detonationsgeschwindigkeit: 7350 m/s
Verpuffungstemperatur: 300–310°C

Pikrinsäure liegt in Form von gelben Blättchen vor, ist giftig und löst sich in heißem Wasser, in Alkohol, Äther, Benzol und Aceton.

Früher wurde Pikrinsäure als Granatenfüllung verwendet. Da sein Säurecharakter zur Bildung von Metallsalzen (Pikraten), d.h. sehr stoßempfindlichen Sprengstoffen führt, hat dieser Sprengstoff heute praktisch keine Bedeutung mehr.

Nitropenta (Pentaerythrittetranitrat, PETN, Pentryl, Penta, Pentaryth)

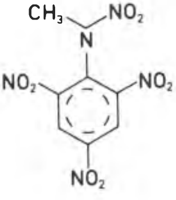


Dichte: 1,76 g/cm^3
Schmelzpunkt 141,3°C
Explosionswärme: 5860 kJ/kg
(H_2O dampfförmig)
Detonationsgeschw.: 8400 m/s
Verpuffungstemp.: 202–205°C

Nitropenta besteht aus farblosen Kristallen; es ist chemisch sehr stabil, läßt sich in Wasser nicht lösen, jedoch in Aceton und Metyhlacetat.

Die Verwendung liegt bei gepreßten Geschoß- und Bombenladungen sowie Übertragungsladungen; dabei wird mit etwas Wachs phlegmatisiert.

Tetryl (Trinitrophenylmethylnitramin, Tetranitromethylanilin, Pyronite, CE, Tetra, Tetralit, Tetralita)

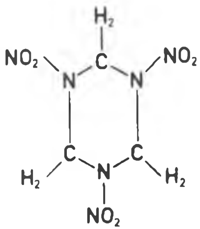


Dichte: 1,73 g/cm^3
Schmelzpunkt: 131°C
Explosionswärme: 4900 kJ/kg (H_2O dampfförmig)
Detonationsgeschw.: 7500 m/s
Verpuffungstemperatur: 185°C

Tetryl liegt als feines gelbliches Pulver vor, ist giftig, löst sich in Wasser kaum, jedoch gut in Benzol.

Die hauptsächliche Verwendung liegt wegen des guten Initiierungsvermögens bei gepreßten Übertragungsladungen; außerdem wird es zusammen mit Trinitrotoluol auch als Füllung von Granaten und Torpedoköpfen eingesetzt.

Hexogen (Cyclotrimethylentrinitramin, Cyclonit, RDX, T4, Trimethylentrinitramin) [17]

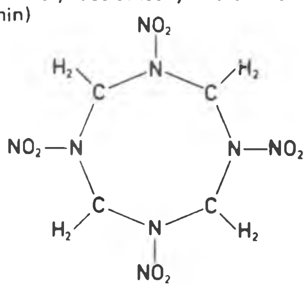


Dichte: 1,802 g/cm^3
Schmelzpunkt: 204° C
Explosionswärme: 5141 kJ/kg (H_2O dampfförmig)
Detonationsgeschw.: 8700 m/s
Verpuffungstemp.: 230°C

Hexogen liegt in Form von farblosen Kristallen vor, die sich in Wasser kaum, in Cyclohexan ziemlich gut lösen. Wegen des nahe beim Schmelzpunkt liegenden Verpuffungspunktes läßt es sich nur in festem Zustand verarbeiten. Hexogen ist heute die wichtigste Komponente von hochbrisanten Sprengstoffladungen wie z.B. Hohlladungen. Es wird in geschmolzenem Trinitrotoluol (s. Composition B) und neuerdings auch in aushärtenden Kunststoffbindern gegossen oder, mit Wachs phlegmatisiert, z.T. mit Metallzusätzen (s. Hexal) verpreßt.

Hexogen kann nur phlegmatisiert transportiert werden (Phlegmatisierungsmittel: TNT, Wachs, Wasser).

Oktogen (Homocyclonite, Tetramethylentetranitramin, HMX, Cyclotetramethylentetramin)



Dichte: 1,82 g/cm³ (α — Modifik.)
1,90 g/cm³ (β — Modifik.)
1,76 g/cm³ (γ — Modifik.)
1,80 g/cm³ (δ — Modifik.)
Schmelzpunkt: 280°C
Explosionswärme: 5116 kJ/kg (H_2O dampfförmig)
Detonationsgeschw.: 9100 m/s
Verpuffungstemp.: 287°C

Es entspricht in seinem Aussehen und seinem Lösungsverhalten dem Hexogen, wie überhaupt seine physikalischen und chemischen Eigenschaften dem Hexogen praktisch gleich sind, mit Ausnahme der höheren Dichte. Da man mit Oktogen wegen der höheren Dichte auch eine höhere Energiedichte erzielen kann, wird heute seine Verwendung für hochgezüchtete Hohlladungen diskutiert. Sein Preis ist allerdings zunächst noch höher als der des Hexogens, weil es vom mitgebildeten Hexogen abgetrennt werden muß.

Wie teilweise bereits angedeutet, werden die beschriebenen Substanzen auch in Gemengen als Sprengstoff verwendet.

Composition B (Compound B, Bonit) ist ein Gemisch aus Hexogen und Trinitrotoluol im Verhältnis 60/40 bis 40/60, das mit TNT in geschmolzenem Zustand bei Temperaturen von 85 bis 100°C nach dem Gießverfahren verarbeitet wird. Composition B wird für Hohlladungen und andere Gefechtsköpfe heute überwiegend verwendet. Bei einer Zusammensetzung im Verhältnis 60/40 kann mit ihm eine Dichte $> 1{,}7$ g/cm³ erreicht werden, wenn man lunkerfrei gießt und auf eine geeignete Korngrößenverteilung des Hexogens achtet. Die Detonationsgeschwindigkeit liegt dann bei 8000 m/s.

Hexotol (Hexolit) ist mit TNT phlegmatisiertes Hexogen (80 Gewichtsprozent Hexogen und 20 Gewichtsprozent TNT). Wenn Hexogen zu Composition B verarbeitet werden soll, dann wird es im allgemeinen als Hexotol gelagert und transportiert.

Hexal besteht aus einer Mischung von Hexogen und Aluminiumpulver, die, mit Montanwachs phlegmatisiert, zu Ladungen verpreßt wird. Hexal wird insbesondere als Sprengstoffladung in Geschossen für die Fliegerabwehr verwendet, weil durch das Aluminium eine sehr hohe Brandwirkung erzielt wird. Außerdem führt Aluminium zu Nachreaktionen in den Sprengstoffschwaden, die wiederum eine Erhöhung des Druckimpulses (Gasschlag) verursachen. Wegen dieser Wirkung des Aluminiums wird es auch Unterwassersprengstoffen beigefügt (z.B. Hexogen/TNT/Al).

Trinalit ist eine Mischung aus Trinitrotoluol und Aluminiumpulver, das ähnliche Eigenschaften hat wie Hexal und auch in ähnlicher Weise eingesetzt wird.

Plastische Sprengstoffe enthalten zum großen Teil (80 bis 90 %) einen hochbrisanten Sprengstoff wie Nitropenta oder Hexogen, der mit einem plastischen Material gebunden ist. Als Binder werden Wachse oder weich polymerisierte Kunststoffe benutzt. Die Ladungen von Quetschkopfgeschossen bestehen teilweise aus solchen plastischen Sprengstoffen.

Holtex ist ein den POL-Pulvern verwandter Sprengstoff, der aus Nitroglycerin, Nitrocellulose und Nitropenta besteht. Dieses Gemisch wird unter Zufügung von Metallseifen gelatiniert. Holtex ist thermoplastisch verformbar, läßt sich sehr gut mechanisch bearbeiten und stellt mit einer Detonationsgeschwindigkeit von 7800 m/s einen brisanten Sprengstoff dar. Varianten dieser Zusammensetzung sind auch als *Nipolit* bekannt.

1.4.2. Zivile Sprengstoffe

Natürlich sind militärische Sprengstoffe auch für verschiedene zivile Verwendungszwecke einsetzbar wie z.B. die Sprengverformung, das Sprengplattieren u.a. Für bestimmte zivile oder gewerbliche Zwecke setzt man jedoch wegen der Forderung besonderer Eigenschaften oder eines gegenüber militärischen Sprengstoffen geringeren Preises andere Substanzen als die unter 1.4.1. genannten ein.

Zwei wichtige Gruppen ziviler Sprengstoffe sind die *Wettersprengstoffe* und die *Gesteinssprengstoffe*.

Wettersprengstoffe, die im Kohlenbergbau eingesetzt werden, sollen Methan-Luft-Gemische (Schlagwetter) und Kohlenstaub-Luft-Gemische nicht zünden, d.h., sie dürfen nur sehr kurze Detonationsflammen entwickeln. Sie werden nach ihrem Sicherheitsgrad in die Klassen *I, II* und *III* eingestuft, wobei die Wettersicherheit von Klasse *I* bis *III* zunimmt und damit die Sprengwirkung abnimmt.

Zur *Klasse I* gehören gelatinöse oder pulverförmige Ammonnitratsprengstoffe, die bis zu 50 Gewichtsprozent Inertsalze homogen verteilt enthalten. Handelsnamen in Deutschland sind: Wetter-Nobelit B und Wetter-Wasagit B (beide gelatinös) sowie Wetter-Detonit A und Wetter-Westfalit A (beide pulverförmig).

Zur *Klasse II* zählen heute Salzpaarsprengstoffe (Kalium- oder Natriumnitrat, Ammoniumchlorid und Sprengöl), teilweise auch Mantelsprengstoffe (Sprengstoffkern und -mantel aus Salzen, wie Natriumbikarbonat, die sich endotherm zersetzen). In Deutschland gebräuchliche Handelsnamen sind: Wetter-Energit A und Wetter-Roburit A (Salzpaarsprengstoffe) sowie Wetter-Nobelit B (M 1) und Wetter-Wasagit B (M 1) (Mantelsprengstoffe).

Die Wettersprengstoffe der *Klasse III* sind *wie in der Klasse II, aber* schwächer durch Variation der Zusammensetzung. Bekannte Handelsnamen in Deutschland: Wetter-Carbonit und Wetter-Securit (Salzpaarsprengstoffe) sowie Wetter-Bikarbit und Wetter-Astralit (Mantelsprengstoffe).

Die Sicherheit der Wettersprengstoffe wird in sog. Versuchsstrecken geprüft.

Bei **Gesteinssprengstoffen** spielen vornehmlich die sichere Handhabung und der Preis eine Rolle. Man unterscheidet pulverförmige Gesteinssprengstoffe (auf der Basis von Ammonnitrat und z.T. noch Kaliumchlorat zusammengesetzt) und gelatinöse Gesteinssprengstoffe. Zur letztgenannten Gruppe gehören die *Sprenggelatine*, die *Dynamite* und die *Ammongelite*.

Sprenggelatine besteht aus 92 bis 94 Gewichtsprozent Nitroglycerin und 6 bis 8 % Collodiumwolle. Unter Einschluß wird eine Detonationsgeschwindigkeit von 7700 m/s erreicht.

Dynamite sind Sprengstoffe auf der Basis des Nitroglycerins. Das erste Dynamit geht auf Alfred NOBEL zurück und besteht aus Nitroglycerin und Kieselgur (75/25). Heute werden Dynamite durch Zumischen von Natriumnitrat sowie Holz- und Pflanzenmehlen zu Sprenggelatine hergestellt.

Ammongelite unterscheiden sich von den Dynamiten dadurch, daß das Nitroglycerin, zumindest teilweise, durch Nitroglykol und das Natriumnitrat durch Ammonnitrat ersetzt ist; außerdem wird eine Mischung von Dinitrotoluol und Trinitrotoluol zugefügt. Ammongelite neigen weniger zum Gefrieren des darin enthaltenen Sprengöls als Dynamite, sie werden daher heute vorzugsweise verwendet.

Neben den genannten gewerblichen Sprengstoffen sei noch das *Oxyliquit* erwähnt, das zwar billig ist, jedoch heute kaum noch verwendet wird. Dabei werden poröse kohlenstoffhaltige Substanzen wie Holzkohlen- oder Korkmehl mit flüssiger Luft oder besser flüssigem Sauerstoff ($\approx -180^{\circ}C$) direkt vor dem Einsatz getränkt.

1.4.3. Initialsprengstoffe

Die vorstehend beschriebenen militärischen und zivilen Sprengstoffe lassen sich im allgemeinen durch gewöhnliche mechanische Beanspruchung nicht zur Reaktion bringen und detonieren bei starker thermischer Belastung nicht, sondern sie brennen ab oder verpuffen.

Um nun eine Detonation bei Sprengladungen überhaupt und vor allem auch zeitlich und geometrisch definiert einzuleiten, werden sehr

empfindliche Initialsprengstoffe eingesetzt, die sich bei mechanischer Beanspruchung oder bei Zuführung von thermischer Energie detonativ umsetzen und so die Sprengladung – ggf. über eine Übertragungsladung aus leichter detonierendem Sprengstoff wie Tetryl – zur Detonation bringen. Wegen ihrer Empfindlichkeit werden die Initialsprengstoffe in Metallkapseln gefüllt verwendet, um sie gegen äußere Einflüsse zu schützen.

Die Zündung erfolgt durch Schlag, Entladung elektrischer Energie über einen Drahtwiderstand (Brückenzünder), durch Funkenentladung oder auch durch Drahtexplosion. Einzelheiten über den Aufbau von mechanischen und elektrischen Zünd- und Sprengkapseln sind in Kap. 13, Zünder, angegeben.

Als Initialsprengstoffe werden folgende chemische Verbindungen verwendet[1]):

Knallquecksilber (Quecksilberfulminat) $Hg = (ONC)_2$
Dichte: 4,42 g/cm^3
Explosionswärme: 1486 kJ/kg
Detonationsgeschwindigkeit: 5400 m/s
Verpuffungstemperatur: 165–170°C

Knallquecksilber liegt in chemisch reiner Form in farblosen Kristallen vor, als technisches Produkt sieht es infolge von Spuren elementaren Quecksilbers grau aus; es ist in Wasser unlöslich. Knallquecksilber findet in gepreßter Form für Zünd- und Sprengkapseln Verwendung (Kapselwerkstoff Kupfer).

Bleiazid $Pb(N_3)_2$

Dichte: 4,8 g/cm^3
Detonationsgeschwindigkeit: 5100 m/s
Verpuffungstemperatur: 330°C

Bleiazid besteht aus farblosen Kristallen, ist in Wasser unlöslich und recht wärmebeständig. Es wird, teilweise mit Bleitrinitroresorcinat sensibilisiert, für Sprengkapseln verwendet (Kapselwerkstoff Aluminium).

Silberazid AgN_3

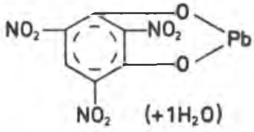
Dichte: 5,1 g/cm^3
Schmelzpunkt: 251°C
Verpuffungstemperatur: 273°C

Das lichtempfindliche Silberazid ist nicht in Wasser, jedoch in Ammo-

1) In der Bundeswehr sind folgende Zusammensetzungen eingeführt: Sprengkräftig: Bleiazid + Bleitrinitroresorcinat und Bleiazid + Tetrazen; nichtsprengkräftig: Bleitrinitroresorcinat + Tetrazen.

niak löslich. Da es bei der Herstellung amorph anfällt, läßt es sich schlecht dosieren. Obgleich es bessere Initiierungseigenschaften als Bleiazid besitzt, hat es wegen schlechterer Handhabungseigenschaften wenig Verwendung gefunden.

Bleitrinitroresorcinat (Bleistyphnat, Bleitrizinat, Trizinat)



Dichte: 3,0 g/cm^3
Explosionswärme: 1550 kJ/kg (H_2O dampfförmig)
Detonationsgeschw.: 4900 – 5200 m/s
Verpuffungstemp.: 275 – 280°C

Es fällt in gelben Kristallen an und löst sich in Wasser nur geringfügig. Mit Bleiazid gemischt, wird es zur Aufladung von Sprengkapseln verwendet. Außerdem ist es mit einem geringen Anteil an Tetrazen Bestandteil der Sinoxid-Sätze.

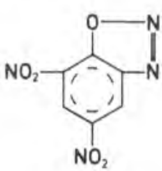
Tetrazen (Guanyl-nitrosamino-guanyl-Tetrazen)

$$H_2N - \underset{\underset{NH}{\|}}{C} - NH - NH - N = N - \underset{\underset{NH}{\|}}{C} - NH - NH - NO$$

Dichte: 1,7 g/cm^3
Verpuffungstemperatur: etwa 140°C

Es liegt in Form von flaumigen, farblosen bis schwachgelben Kristallen vor, ist praktisch in Wasser und den meisten organischen Lösungsmitteln unlöslich. Seine Bedeutung liegt in seiner Verwendung als Zusatz zu den Sinoxid-Sätzen.

Diazodinitrophenol (Dinol, D.D.N.P., Diazol)



Dichte: 1,63 g/cm^3
Detonationsgeschw.: 6600–7100 m/s
Verpuffungstemp.: 180–200°C

Es fällt als gelbliches bis rotgelbes amorphes Pulver an und ist in Wasser kaum löslich. In den USA wird es als Initialsprengstoff verwendet.

1.4.4. Prüfmethoden für Sprengstoffe

Die Prüfung der Sprengstoffe erfolgt auf chemische Stabilität, Empfindlichkeit und Leistungsdaten.

Die *chemische Stabilität* der Sprengstoffe wird nach den gleichen Methoden geprüft wie die der Treibstoffe; diese Verfahren sind unter 1.3.5 angedeutet.

Die Ermittlung der *Empfindlichkeit* bezieht sich auf die Reibungsempfindlichkeit, die Schlagempfindlichkeit und die thermische Empfindlichkeit.

Bei der *Reibungsempfindlichkeit* wird der zu prüfende Sprengstoff zwischen zwei sich gegeneinander bewegenden rauhen Porzellanflächen aufgenommen. Diese Flächen werden aufeinandergepreßt; die Anpreßkraft wird so lange gesteigert, bis beim Sprengstoff der Beginn einer Reaktion zu beobachten ist. Der Wert der Anpreßkraft, bei der die Reaktion einsetzt, ist dann die Maßzahl für die Reibungsempfindlichkeit.

Zur Ermittlung der *Schlagempfindlichkeit* verwendet man die Fallhammermethode, bei der man einen Fallhammer bestimmten Gewichtes aus zunehmend größerer Höhe auf die Sprengstoffprobe fallen läßt. Die Fallhöhe, bei der eine Reaktion einsetzt, multipliziert mit dem Hammergewicht, ist die Maßzahl für die Schlagempfindlichkeit.

Die *thermische Empfindlichkeit* wird nach dem Stahlhülsenverfahren festgestellt. Dabei wird eine bestimmte Menge des zu prüfenden Sprengstoffs in eine Stahlhülse gebracht, die durch einen mit einer Bohrung versehenen Deckel abgeschlossen ist. Die Stahlhülse wird mit einem Gasbrenner aufgeheizt; dabei verpufft der Sprengstoff, und die Schwaden treten durch die Bohrung im Deckel aus. Die Bohrung wird nun so lange verkleinert, bis der bei der Zersetzung des Sprengstoffs in der Hülse entstandene Druck zu einer Zerlegung der Hülsenwandung führt. Der Bohrungsdurchmesser gibt dann die thermische Empfindlichkeit an.

Für eine detaillierte Beschreibung dieser Empfindlichkeitsprüfungen, die bei der BAM entwickelt wurden, wird auf die Literatur verwiesen [18], [19].

Bei den *Leistungsdaten* interessiert zunächst die *Detonationsgeschwindigkeit*, die bei einheitlichen Sprengstoffen nach einer Anlaufstrecke einen konstanten Wert erreicht. Es genügt also zunächst, die

Zeit zu messen, die die Detonationsfront benötigt, um bei einer Sprengstoffsäule eine definierte Strecke zurückzulegen. Um ein für die Meßgenauigkeit ausreichend großes Zeitintervall zu haben, wird man die Meßstrecke nicht zu klein wählen (100 bis 300 mm). Für die Zeitmessung verwendet man heute elektronische Zeitmesser (Counter). Der Start- und der Stoppimpuls werden durch offene Doppeldrähte gegeben, die am Anfang und am Ende der Meßstrecke in den Sprengstoff eingebracht sind und durch die über sie hinweglaufende Detonationswelle kurzgeschlossen werden.

Das klassische Verfahren nach DAUTRICHE verwendet als Zeitmesser eine Detonationszündschnur genau bekannter Detonationsgeschwindigkeit. Die Dautriche-Methode ist in Bild 107 schematisch dargestellt.

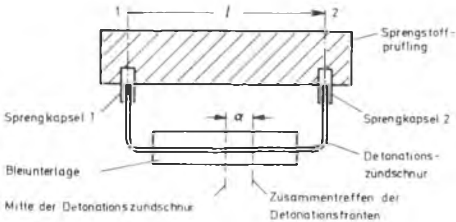


Bild 107. *Anordnung zum Messen der Detonationsgeschwindigkeit nach DAUTRICHE.*

In dem Sprengstoffprüfling sind an den Meßstellen 1 und 2 im Abstand l voneinander die Sprengkapseln 1 und 2 angeordnet; diese übertragen die Detonation auf die beiden Enden der Detonationszündschnur, wenn die Detonationsfront im Prüfling die jeweilige Meßstelle überstreicht. Dem mittleren Teil der Detonationszündschnur ist eine Bleiplatte unterlegt, auf der eine besondere Markierung dort entsteht, wo sich die beiden in der Detonationszündschnur entgegenlaufenden Detonationswellen treffen. Der Abstand dieses Treffpunktes von der Mitte der Schnur sei a; dann ergibt sich die Detonationsgeschwindigkeit D des Prüflings (mit D_Z als Detonationsgeschwindigkeit der Schnur) als

$$D = D_Z \frac{l}{2a} .$$

Neben diesem Verfahren kann man die Detonationsgeschwindigkeit auch mit Hilfe der Streak-Kamera messen, indem man die Neigung der durch die Detonationsfront hervorgerufenen Belichtungsspur auswertet.

Dabei erhält man auch Informationen über durch Inhomogenitäten im Sprengstoff hervorgerufene Schwankungen der Detonationsgeschwindigkeit. Solche Schwankungen können auch elektronisch gemessen werden.

Andere Leistungsdaten, die Auskunft über das Arbeitsvermögen oder die Brisanz eines Sprengstoffes geben, sind die Bleiblockaufbauchung nach TRAUZL, der ballistische Mörser, der Sandtest und die Stauchung nach KAST oder HESS.

Bei der *Bleiblockmethode nach TRAUZL* wird eine Sprengstoffprobe mit elektrischer Detonatorkapsel in die Bohrung eines Bleizylinders gebracht, mit Sand abgedeckt und gezündet. Die durch die Detonation hervorgerufene Vergrößerung des Bohrungsvolumens wird gemessen.

Der *ballistische Mörser* besteht aus einem als Pendel aufgehängten, einseitig angebohrten Zylinder, in dessen Bohrung eine Ladung (10 g) des zu prüfenden Sprengstoffs eingebracht wird. Die Öffnung wird durch ein eingepaßtes Geschoß abgeschlossen. Der gezündete Sprengstoff überträgt einen Impuls auf Mörser und Geschoß, der zu einem Pendelausschlag des Mörsers führt. Dieser Ausschlag ist ein Maß für das Arbeitsvermögen des Sprengstoffs; es wird in Prozent des Arbeitsvermögens von Sprenggelatine (= 100%) angegeben.

Beim *Sandtest* (USA) wird der Sprengstoffprüfling von einer bestimmten Menge Sandes definierter Korngrößenverteilung umgeben. Nach der Detonation wird durch Siebanalyse die Zerkleinerung des Sandes festgestellt.

Die *Brisanz* eines Sprengstoffs wird experimentell ermittelt, indem man eine Sprengladung gegen einen Zylinder aus Kupfer (KAST) oder Blei (HESS) sprengt und die Stauchung mißt.

Von KAST wurde auch eine rechnerische Methode zur Bestimmung der Brisanz angegeben. Danach ist die Brisanz definiert als Produkt aus Ladedichte, spezifischer Energie ($f = nRT$) und Detonationsgeschwindigkeit.

1.4.5. Theorie der Detonation

Die Theorie der Detonation geht von dem experimentellen Befund aus, daß sich die detonative Umsetzung eines Sprengstoffes – unabhängig von dessen Aggregatzustand – mit konstanter Geschwindigkeit, der Detonationsgeschwindigkeit D, fortpflanzt; außerdem tritt in der Detonationsfront ein erheblicher Drucksprung auf (bei festen Sprengstoffen $1:10^5$). Daher liegt es nahe, auf die Vorgänge bei einer detonierenden Sprengstoffsäule die Theorie der ebenen Stoßwelle anzuwenden. Das wurde von CHAPMAN und JOUGUET [20], [21]

durchgeführt; eine Zusammenfassung der Theorie und eine kritische Diskussion findet sich bei BECKER [22].

Die Stoßwellentheorie der Detonation wird auch als *hydrodynamische Theorie* bezeichnet.

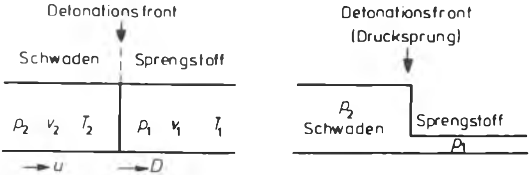


Bild 108. *Zur Beschreibung des Detonationsvorganges.*

Die Grundgleichungen der Stoßwellentheorie erhält man, wenn man die Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie, bezogen auf die sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegende Stoßwelle, aufstellt und dann durch Geschwindigkeitstransformation auf das ruhende Bezugssystem zurückführt.

Wenn man den Zustandsgrößen p, v und T des Sprengstoffes vor der Detonationsfront, wie in Bild 108 bezeichnet, den Index 1 und den Zustandsgrößen für die Schwaden direkt hinter der Detonationsfront den Index 2 zuordnet, dann ergeben sich aus der hydrodynamischen Theorie folgende Beziehungen für die Detonationsgeschwindigkeit D und die Geschwindigkeit u, mit der die direkt hinter der Detonationsfront befindlichen Schwaden auf diese zustoßen.

$$D^2 = v_1^2 \frac{p_2 - p_1}{v_1 - v_2}, \quad (29)$$

$$u^2 = (p_2 - p_1)(v_1 - v_2). \quad (30)$$

Für die Energiedifferenz $E_2 - E_1$ mit Q als Explosionswärme des Sprengstoffes und c_V als spezifische Wärme bei konstantem Volumen gilt:

$$E_2 - E_1 = c_{v2}T_2 - c_{v1}T_1 - Q = \frac{1}{2}(p_2 + p_1)(v_1 - v_2) \quad (31)$$

Die möglichen Zustände „2" der Detonationsschwaden unterliegen nun folgender Beziehung, die als Rankine-Hugoniot-Beziehung oder dynamische Adiabate bezeichnet wird:

$$c_V(T - T') = \frac{1}{2}(p + p')(v - v'). \qquad (32)$$

Führt man in Gleichung (32) eine Zustandsgleichung ein, wobei sich für die Schwaden von festen Sprengstoffen die Abelsche Gleichung (s. u.a. 1.3.5.) bewährt hat, so läßt sich die dynamische Adiabate im p-v-Diagramm darstellen, wie in Bild 109 als Kurve 2 gezeigt.

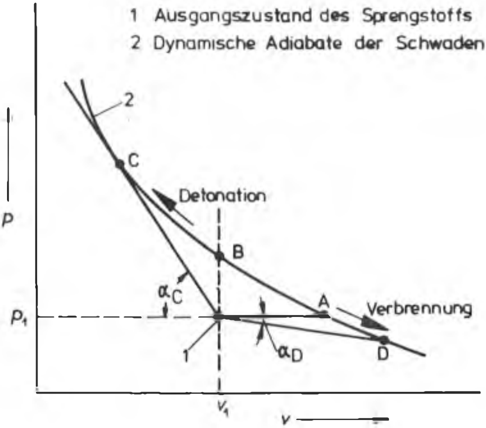


Bild 109. *Dynamische Adiabate (Hugoniot-Kurve) für Sprengstoffe.*

In Bild 109 ist außerdem der Ausgangszustand 1 des Sprengstoffes eingetragen, der wegen der Energiedifferenz in Form der Explosionswärme Q unterhalb der Hugoniot-Kurve der Schwaden liegt. Bei einer Umsetzung des Sprengstoffes findet also ein Übergang vom Punkt 1 zu irgendeinem Punkt der Kurve 2 statt. Die Verbindungslinie zwischen dem Zustand 1 und einem Zustand 2 bildet nun einen Winkel α mit der v-Achse.

Es gilt: $$\tan \alpha \sim \frac{p_2 - p_1}{v_1 - v_2}. \qquad (33)$$

Nach Gleichung (29) ist damit

$$D \sim (\tan \alpha)^{\frac{1}{2}}. \qquad (34)$$

Da $\tan \alpha$ im Bereich A—B negative Werte annimmt, würde die Detonationsgeschwindigkeit imaginär sein; Zustandsänderungen im Bereich A—B sind also nicht möglich.

Für Schwadenzustände jenseits von „A", wie z.B. „D", hat $\tan \alpha$ und damit die Geschwindigkeit D geringe Werte. Außerdem läßt sich anhand der Beziehung

$$\frac{D}{u} = \frac{1}{1 - \frac{v_2}{v_1}}, \qquad (35)$$

die sich durch Division der Gleichungen (29) durch (30) ergibt, zeigen, daß für $v_2 > v_1$ die Strömungsgeschwindigkeit u zu D entgegengerichtet ist; d.h., die Gase strömen von der Reaktionszone weg. $v_2 > v_1$ gilt nun für die Schwadenzustände jenseits „A", so daß hier die für die *Verbrennung* charakteristischen Verhältnisse vorliegen: Die Fortpflanzungsrichtung der Reaktion ist der Strömungsrichtung der Schwaden entgegengesetzt.

Von „B" aus zu kleineren Werten von v hin gilt $v_2 < v_1$; d.h., die Fortpflanzung der Reaktion und die Schwadenströmung sind gleichgerichtet. Es handelt sich hier um das *Detonationsgebiet,* wo ein stationärer Zustand durch das Nachströmen der Schwaden erhalten wird.

Abgesehen vom Punkt „C" der Hugoniot-Kurve der Schwaden, den eine vom Sprengstoffzustand 1 ausgehende Gerade tangiert, gehören zu jedem $\tan \alpha$ und damit zu jeder Detonationsgeschwindigkeit, sofern die Kurve 2 geschnitten wird, zwei Schwadenzustände.

Nach CHAPMAN und JOUGUET wird nun postuliert, daß ein stationärer Detonationsvorgang dann vorliegt, wenn der Übergang im Berührungspunkt C erfolgt, also

$$-\frac{p_2 - p_1}{v_1 - v_2} = \left(\frac{dp_2}{dv_2}\right)_{Hug.} \qquad (36)$$

Für „C", den CHAPMAN-JOUGUET-POINT, läßt sich auch zeigen, daß

$$D = u + a \qquad (37)$$

ist, wobei a die Schallgeschwindigkeit in den Schwaden bedeutet.

Aus den Gleichungen (36) und (37) lassen sich folgende, für praktische Rechnungen nützliche Formeln ableiten:

Für den Druckunterschied zwischen Sprengstoff und Schwaden direkt hinter der Detonationsfront gilt

$$\Delta p = D^2 \rho_1 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right); \qquad (38)$$

die Strömungsgeschwindigkeit der Schwaden berechnet sich zu

$$u = D \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right). \qquad (39)$$

Darin ist die Sprengstoffdichte ρ_1 natürlich sehr leicht zu bestimmen; die Messung der Detonationsgeschwindigkeit D wurde unter 1.4.4 , Prüfmethoden, angegeben; die Schwadendichte ρ_2 kann durch Auswertung der Schwärzung von Röntgenblitzaufnahmen an detonierenden Sprengstoffen ermittelt werden. Die Dichte der gasförmigen Schwaden ist größer als die des festen Sprengstoffes; bei Trinitrotoluol ist $\rho_2 / \rho_1 = 1{,}22$ (s. KUTTERER [13], S. 167).

1.4.6. Militärische Anwendung der Sprengstoffe

Die Bedeutung der Sprengstoffe für militärische Zwecke liegt einmal in der Druckwirkung und zum andern in der Beschleunigung von Belegungen bei der Detonation. Der Detonationsdruck kann entweder direkt oder durch Umgebungsmedien wie Luft oder Wasser übertragen auf Objekte einwirken und dort Wirkungen hervorrufen: Bei den beschleunigten Belegungen kann es sich um Geschoßhüllen handeln, die sich bei der Detonation in Splitter mit beträchtlicher Anfangsgeschwindigkeit zerlegen. Andere Belegungen bestehen aus Metallkörpern, die quer zur Detonationsrichtung der Ladung an deren vorderen Seite angebracht werden; bei der Detonation werden diese Belegungen teilweise oder vollständig auf sehr hohe Geschwindigkeiten beschleunigt (projektilbildende Ladungen, Hohlladungen). Ladungen dieser Art werden vornehmlich für den Panzerdurchschlag eingesetzt.

Daß neben der Druck-, Splitter- und panzerbrechenden Wirkung auch die Brandwirkung von Sprengstoffladungen (Aluminiumzusätze) eine wichtige Rolle spielt, ist bereits bei der Beschreibung der verschiedenen Sprengstoffe erwähnt worden.

1.4.6.1. Druckwirkung von Sprengladungen

Bei der Druckwirkung von detonierenden Sprengladungen ist ein Nah- und ein Fernbereich zu unterscheiden.

Der *Fern*bereich liegt vor, wo aufgrund des Detonationsdruckes durch die Umgebungsmedien Luft oder Wasser eine Stoßwelle läuft; dabei sind aber an der mit dem Vorgang verbundenen Gasströmung keine Schwaden mehr beteiligt. Die Stoßwelle hat einen Druckverlauf über der Zeit, wie er in Bild 110 dargestellt ist.

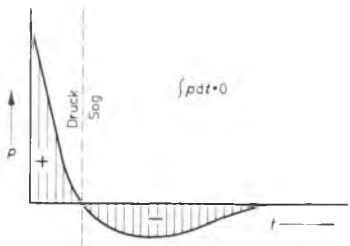


Bild 110. *Stoßwelle; Druck über der Zeit für einen festen Ort.*

Ein fester Bezugspunkt wird also zunächst von einem Überdruckbereich und dann von einem Unterdruckbereich (Sog) durchlaufen. Der Maximalwert des Überdruckes kann mehrere Bar betragen, während der Unterdruck natürlich nicht größer sein kann als der Atmosphärendruck von rd. 1 bar. Aus dem Impulserhaltungssatz folgt $\int p\,dt = 0$, was wiederum bedeutet, daß der Unterdruckbereich wesentlich länger andauert als der Überdruckbereich.

Trifft eine Stoßwelle auf ein Objekt, dann ruft sie dort Zerstörungen hervor, die durch Reflexion der Welle an der Objektoberfläche verstärkt werden, weil dabei eine Druckerhöhung auftritt.

Für den Maximaldruck in der Stoßwelle gilt folgende Beziehung mit Q_{ex} als Explosionswärme und r als Abstand vom Sprengpunkt:

$$p = \frac{A \cdot \sqrt[3]{Q_{ex}^2}}{r^2} \qquad (A = \text{Konstante}). \qquad (40)$$

Der Spitzendruck nimmt also quadratisch mit der Entfernung ab. So wird schließlich ein Entfernungsbereich erreicht, bei dem die Sogwirkung wegen der wesentlich längeren Einwirkzeit die Druckwirkung überwiegt. Das äußert sich an Gebäuden innerhalb dieses Bereiches darin, daß Dächer abgedeckt werden und Fensterscheiben nach außen zerplatzen.

Im *Nah*bereich wirken die bei der Detonation entstehenden Schwaden direkt auf die Objekte ein. Hier ist es von besonderer Bedeutung, den Druckabfall in den Schwaden, z.B. durch Nachreaktion mit eingebrachtem Aluminiumpulver, möglichst flach zu gestalten.

Bei Luftminen als Bomben und bei Minengeschossen zur Bekämpfung von Flugzeugen wird mit Vorrang die Druckwirkung der detonierenden Sprengladung zur Objektzerstörung verwandt. Bei dieser Art von Munition ist die den Sprengstoff umgebende Metallhülle vergleichsweise dünn bemessen ($m_{Sprengst.} : m_{Projektil} = 0{,}25$ bis 0,30), um bei vorgegebenem Volumen möglichst viel Sprengstoff unterzubringen. Minengeschosse mit Aufschlagzünder enthalten Aluminiumzusätze im Sprengstoff, um die Gasschlagwirkung durch Nachreaktion in den Schwaden zu erhöhen (vgl. 1.4.1, Hexal, Trinalit).

Wenn man eine Sprengladung im direkten Kontakt gegen eine Panzerplatte sprengt, dann wird die Platte von einer Stoßwelle durchlaufen, die an der freien Oberfläche reflektiert wird. Dabei kommt es im Plattenmaterial zu einer Spannungsüberlagerung, die zur Ablösung einer Schale auf der rückwärtigen Seite der Platte führt (Hopkins- oder Abplatzeffekt); diese mit erheblicher Geschwindigkeit abplatzende Schale verursacht dann Zerstörungen hinter der Panzerplatte.

Dieser Effekt wird in *Quetschkopfgeschossen*[1] angewandt, bei denen eine leichte Geschoßhülle einen plastischen Sprengstoff und einen Bodenzünder mit Verzögerung enthält. Trifft das Quetschkopfgeschoß auf eine Panzerung, so verquetscht sich der Sprengstoff auf der äußeren Oberfläche der Panzerung, bis er eine für den Abplatzeffekt optimale Form hat, und wird dann gezündet.

1.4.6.2. Splitterladungen

Splitterladungen bestehen aus einem Sprengstoffkörper, dessen Oberfläche mit einer Wandung aus metallischem Werkstoff, im allgemeinen Stahl, belegt ist; die Belegung wird bei der Detonation des Sprengstoffes zerlegt und die Bruchstücke werden auf vergleichsweise hohe Geschwindigkeiten beschleunigt. Diese Ladungen finden Anwendung als Sprenggeschosse, Sprengbomben, Sprengminen, Handgranaten u.ä.

---

1) Vgl. 11.2.3.4, Quetschkopfgeschosse.

Die Wandung ist im allgemeinen homogen; sie kann aber auch mit Sollbruchstellen versehen oder aus Einzelelementen zusammengesetzt sein. Sollbruchstellen entstehen durch Wandstärkenschwächungen an bestimmten Stellen oder durch Verminderung der Werkstoffestigkeit in bestimmten schmalen Zonen, z.B. mit Hilfe einer Elektronenstrahlbehandlung. Die bei vorbestimmter Zerlegung während der Detonation entstehenden Fragmente werden vorgeformte oder Konstruktionssplitter (K-Splitter) genannt.

Die Wirkung der Splitterladungen besteht darin, daß die Splitter bis zu einem bestimmten Abstand vom Sprengpunkt in Objekte eindringen bzw. diese durchschlagen und dadurch Zerstörungen hervorrufen. Wenn man einen einzelnen Splitter betrachtet, dann hängt seine Wirkung in einer gewissen Distanz vom Sprengpunkt von seiner Geschwindigkeit, seiner Masse, seiner Form und seiner momentanen Lage am betrachteten Ort ab; diese wiederum werden bestimmt durch den Zerlegungsvorgang (Masse, Form), die Beschleunigung (Anfangsgeschwindigkeit) und die Wirkung der Luftkräfte (Geschwindigkeit am Objekt). So läßt sich der Ablauf der Splitterwirkung in vier Phasen aufteilen, die insgesamt als *Splitterballistik* bezeichnet werden:

Zerlegung der Belegung,
Beschleunigung der Fragmente,
Geschwindigkeitsabfall durch Luftkräfte und
Eindringen in das Ziel (Objektbeschädigung).

Für die *Zerlegung* der homogenen Belegung oder der Hülle ist die Art des Sprengstoffes, die Initiierung, das Kaliber, das Durchmesserverhältnis von Sprengstoff und Gesamtladung sowie die Qualität des Hüllenwerkstoffes entscheidend. Oft läßt sich gerade durch die Wahl einer optimalen Stahlqualität die Zerlegung erheblich verbessern. Das Verhältnis Sprengstoffgewicht zu Gesamtgewicht der Ladung liegt bei Splitterladungen zwischen 0,1 und 0,2; bei Sprengbrandgeschossen mit Leuchtspur kleineren Kalibers kann dieses Verhältnis bis auf 0,05 zurückgehen.

Die bei der Zerlegung auftretenden Splittergrößen, die Splittergrößenverteilung, wird in der Sprenggrube (Bild 111) ermittelt.

Die Splitterladung wird, von einem Luftraum umgeben, in eine mit Sand gefüllte Grube eingebracht, deren Abdeckung mit Sandsäcken beschwert wird, um die Sprengwirkung nach außen zu dämpfen. Die Zündung wird von außen durch Zuführung elektrischer Energie oder bei mechanischen Zündern durch eine Abreißleine eingeleitet.

Der Luftraum zwischen Ladung und Sandfüllung, der durch einen Pappzylinder gebildet wird, beeinflußt die Splitterzerlegung, wenn er nicht groß genug ist. Nach H. HÄNSEL [23] sollte $D \approx 5d$ sein.

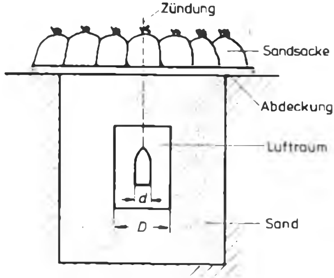


Bild 111. *Sprenggrube.*

Die bei der Detonation der Ladung entstehenden Splitter werden in der Grube aufgefangen und aus der Sandfüllung ausgesiebt; um sie von NE-Metallen (vom Zünder oder anderen Teilen) zu trennen, wendet man Magnete an. Die gesammelten Splitter werden heute im allgemeinen noch von Hand gewogen und, nach Gewichtsklassen sortiert, ausgezählt.

Um das aufwendige Sieben beim Sprengen in der Sandgrube zu vermeiden, haben LINDEIJER und LEEMANS [24] die ältere Idee der Sprengung unter Wasser und das Auffangen der Splitter in einem Netz wieder aufgegriffen. Für die Sortierung der Splitter werden automatische Klassifizieranlagen erprobt.

Als typisches Beispiel für die *Splittergrößenverteilung* werden in den Bildern 112, 113, 114 und 115 die Ergebnisse der Grubensprengung bei 30-mm-Geschossen gezeigt. In Bild 112 sind die nach Gewichtsklassen sortierten und ausgelegten Splitter des Sprengbrandgeschosses fotografiert.

Bild 113 zeigt das Splitterfoto für das Minengeschoß des gleichen Kalibers. In Bild 114 und 115 ist über den Gewichtsklassen die jeweils festgestellte Zahl der Splitter für beide Geschoßarten aufgetragen.

Die *Beschleunigung* der bei der Zerlegung der Ladungshülle entstandenen Splitter hängt besonders von der Massenbelegung $\mu = m_{Hülle} : m_{Sprengstoff}$ ab. Die Impulsübertragung erfolgt einmal durch die bei der Detonation des Sprengstoffes in die Hülle eingeleitete und an deren Innenflächen mehrfach reflektierende Stoßwelle, zum anderen dadurch, daß die Splitter von den expandierenden Sprengstoffschwaden angeströmt werden. Die Bewegungsrichtung der Splitter ist im wesentlichen senkrecht zur Ladungsoberfläche.

Mit Hilfe von Röntgenblitzaufnahmen läßt sich der Beschleunigungsvorgang der Splitter im einzelnen analysieren. Nach neuen Werten, die

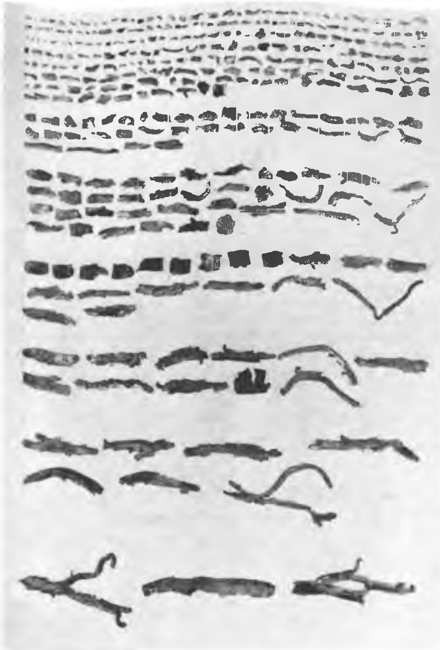


Bild 112.
Splitterfoto des 30-mm-Sprengbrand-geschosses.

von M. HELD [25] an Stahlkugeln als Belegung durchgeführt wurden, ist der Beschleunigungsvorgang bei streifendem Einfall der Detonationsfront nach etwa 6 μs abgeschlossen; die größte Beschleunigung tritt unter dem Einfluß der Stoßwelle über einer Zeitspanne von $\leqslant 1\,\mu$s auf. Bild 116 zeigt die Röntgenblitzaufnahme einer detonierenden Splitterladung.

Am Ende der Beschleunigungsphase erreichen die Splitter Geschwindigkeiten zwischen 1000 und 1500 m/s, denen bei im Flug gezündeten Geschossen noch die momentane Fluggeschwindigkeit vektoriell zu addieren ist. Durch die Eigengeschwindigkeit des Geschosses liegen die Flugbahnen der Mehrzahl der Splitter in einem nach vorn geöffneten Kegel, dessen Winkel vom Verhältnis Geschoßgeschwindigkeit/Splittergeschwindigkeit bei ruhendem Geschoß bestimmt wird.

Der beim weiteren Flug der Splitter auftretende *Geschwindigkeitsverlust durch Luftkräfte* ist schwer abzuschätzen, weil die Splitter sehr

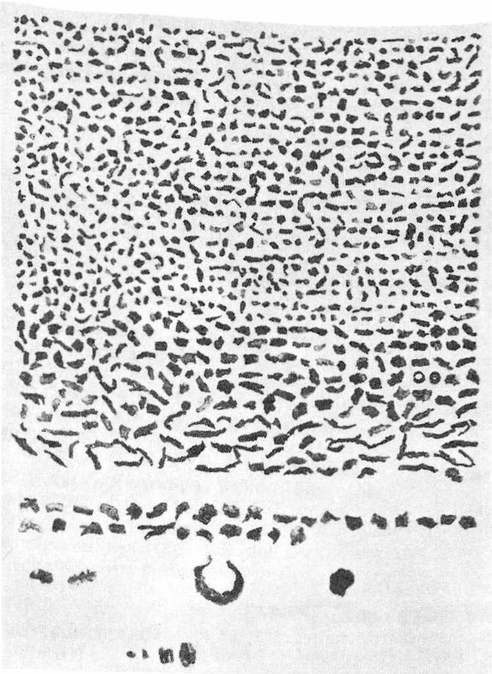


Bild 113. *Splitterfoto des 30-mm-Minengeschosses.*

komplizierte geometrische Formen haben und sich während des Fluges im allgemeinen mehrmals überschlagen, da sie nicht stabil fliegen. Der Geschwindigkeitsabfall ist jedenfalls so groß, daß kleine Splitter (< 0,5 g) trotz ihrer hohen Anfangsgeschwindigkeit schon nach einigen Metern ihre Wirksamkeit verlieren.

Das Vermögen zum *Eindringen in das Ziel* oder zur *Objektbeschädigung* wird charakterisiert durch den Begriff des wirksamen Splitters, dessen Definition lautet: *Ein Splitter ist dann wirksam, wenn er ein 1,5 mm starkes Stahlblech durchschlägt.*

Die Zahl der *wirksamen* Splitter in Abhängigkeit von der Entfernung wird im Sprenggarten (Splittergarten) ermittelt. Er besteht aus mehreren Schirmen von 1,5-mm-Stahlblech, die in verschiedenem Abstand um einen Mittelpunkt angeordnet sind, wie in Bild 117 schematisch dargestellt. Im Mittelpunkt dieser Anordnung wird die Splitterladung liegend gesprengt.

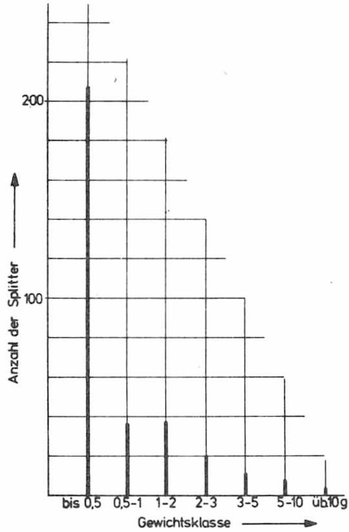


Bild 114.

30-mm-Sprengbrandgeschoß, Zahl der Splitter in Abhängigkeit von der Gewichtsklasse.

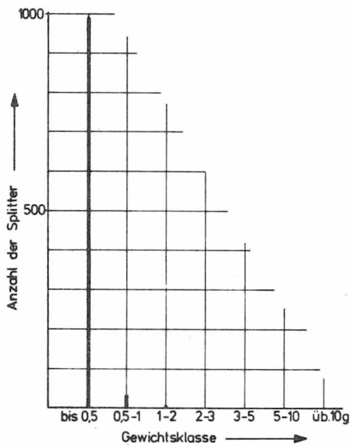


Bild 115.

30-mm-Minengeschoß, Zahl der Splitter in Abhängigkeit von der Gewichtsklasse.



Bild 116.
Röntgenblitzaufnahme einer detonierenden Splitterladung.

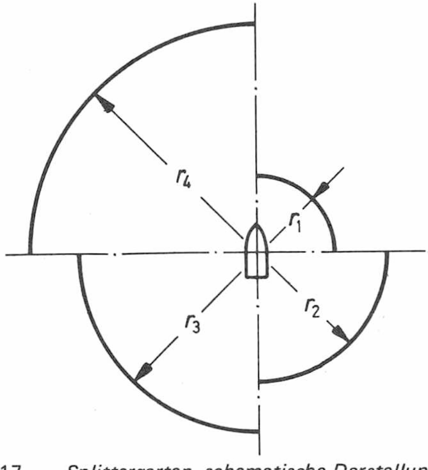


Bild 117. *Splittergarten, schematische Darstellung.*

Durch Auszählen der Splitterdurchschläge auf den Blechschirmen erhält man die Zahl der wirksamen Splitter in Abhängigkeit von der Entfernung und deren räumliche Verteilung.

Da Splitterladungen im allgemeinen zwar rotationssymmetrisch sind, aber, wie z.B. bei Sprenggeschossen, im vorderen und hinteren Teil eine unterschiedliche Form haben, werden hierbei zwei Sprengungen durchgeführt; dabei wird die zweite Ladung in ihrer Längsrichtung (Geschoßspitze – Geschoßboden) um 180° gegenüber der in Bild 117 gezeichneten Lage der ersten Ladung gedreht.

In Bild 118 ist als Beispiel die Zahl der wirksamen Splitter über der Entfernung für das 30-mm-Sprenggeschoß dargestellt.

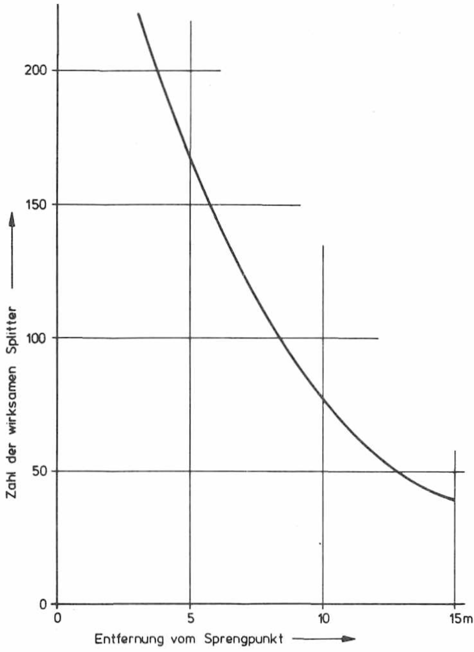


Bild 118. *Zahl der wirksamen Splitter in Abhängigkeit von der Entfernung vom Sprengpunkt für das 30-mm-Sprenggeschoß.*

Für die Wirksamkeitsuntersuchungen ist entscheidend, wieviel wirksame Splitter je Flächeneinheit in Abhängigkeit von der Entfernung auftreten. Diese Zahl wird als *Splitterdichte* bezeichnet.

Die Splitterdichte nimmt mit der Entfernung ab, einmal wegen des Energieverlustes der Splitter durch die Luftkräfte, zum anderen einfach aus geometrischen Gründen wegen der mit größerem Abstand vom Sprengpunkt immer mehr zunehmenden Oberfläche, durch welche die Splittergarbe hindurchtritt. Die geometrisch bedingte Abnahme der Splitterdichte geht bei zylinderförmigen Ladungen, bei denen nur die Mantelfläche belegt ist, mit r^{-1} und bei kugelförmigen Ladungen, die zentral initiiert wurden, mit r^{-2}.

Zur abgekürzten Kennzeichnung der Wirkung einer Splitterladung wird häufig die Entfernung angegeben, bei der die Splitterdichte „1", d.h. *ein* wirksamer Splitter je m^2, auftritt.

Von besonderem Interesse ist u.a. die Wirkung von Splitterladungen in Form von Sprenggeschossen auf Flugzeuge. Für die Fliegerabwehr sind heute als Ergänzung zu Raketen im wesentlichen automatische Kanonen im Kaliberbereich von 20 bis 40 mm gegen die Bedrohung durch tieffliegende Maschinen von Bedeutung. Die entsprechenden Geschosse haben einen Aufschlagzünder mit Verzögerung, der beim Auftreffen auf die Flugzeughaut anspricht und nach Eindringen des Geschosses in die Zelle um einen Weg von etwa 5 Kaliber die Detonation einleitet.

Wieviel Treffer zu einem Ausfall der beschossenen Maschine führen, hängt nun von den Geschossen, der Art und Größe der Maschine und der Lage der Treffer ab. Im allgmeinen kann man mit einer additiven Akkumulierung der durch die einzelnen Treffer verursachten Schäden bis zum Ausfall rechnen, so daß sich eine Zerstörwirkung je Treffer nach folgender Beziehung definieren läßt:

$$p_{k|h} \cdot N_k = 1. \qquad (41)$$

Dabei bedeutet $p_{k|h}$ die Zerstörungswahrscheinlichkeit je Treffer und N_k die für den Ausfall erforderliche Zahl von Treffern.

Für $p_{k|h}$ sind die verschiedensten Abhängigkeiten vom Geschoßgewicht oder dem Sprengstoffgewicht und dem Flugzeugtyp aufgestellt worden. Hier sei nur die von MOLITZ [26] vorgeschlagene Funktion angegeben, die das Sprengstoffgewicht als Variable verwendet:

$$p_{k|h} = 1 - e^{-(m/m_0)\lambda} \qquad (42)$$

mit m = Sprengstoffgewicht,
m_0 = Normierungsparameter

und $\lambda > 1$.

Der Verlauf der Funktion der Gleichung (42) ist in Bild 119 graphisch dargestellt.

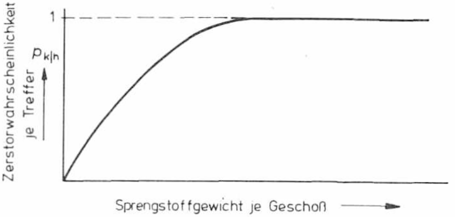


Bild 119. *Abhängigkeit der Zerstörungswahrscheinlichkeit je Treffer vom Sprengstoffgewicht je Geschoß.*

Man erkennt aus Bild 119, daß $p_{k|h}$ nach Gleichung (42) mit zunehmendem Sprengstoffgewicht dem Sättigungswert „1" zustrebt. Wann diese Sättigung erreicht wird, so daß eine Steigerung des Sprengstoffgewichtes je Geschoß zum „overkill" führen würde, ist bisher umstritten. Der Grund für das Fehlen verbindlicher Werte für $p_{k|h}$ ist in dem außerordentlich hohen Aufwand der erforderlichen Versuche zu sehen. Außerdem unterliegen solche Werte, soweit Ergebnisse vorliegen, der militärischen Geheimhaltung.

1.4.6.3. Hohlladungen

Wenn die bei der Detonation einer Sprengstoffladung freigesetzte Energie durch eine Stoßwelle übertragen wird, dann nimmt die Zerstörungswirkung auf ein Objekt mit der Entfernung sehr stark ab, denn für die Zerstörung ist der Impuls je Flächeneinheit (Impulsdichte) entscheidend, und die Impulsdichte reduziert sich bei kugelförmiger Detonation mit r^{-2}. Wird die Sprengstoffenergie jedoch durch eine Belegung der Ladung übertragen, so ist trotz des schlechten Wirkungsgrades bei dieser Übertragung auf größere Entfernung die Impulsdichte für die Querschnittsfläche des Belegungselementes wesentlich höher. Natürlich tritt diese hohe Impulsdichte nur in einem geringen Anteil des gesamten Raumwinkelbereiches um die Ladung auf. Die im Vorangegangenen beschriebene Splitterladung ist letztlich genau so unter diesem Gesichtspunkt zu verstehen wie die hier zu erläuternden Hohlladungen.

Es lassen sich in grober Unterteilung drei Arten von Ladungen unterscheiden, bei denen in definierter Weise eine Energieübertragung vom detonierenden Sprengstoff auf die Belegung stattfindet:

sprengstoffbeschleunigte Geschosse,
Flachkegel-Hohlladungen und
Spitzkegel-Hohlladungen.

Bei den sprengstoffbeschleunigten Geschossen (s.S. 63) wird die Belegung bei der Detonation ohne wesentliche Verformung beschleunigt. Die Impulsdichte ist hier am geringsten.

Die Belegung der Flachkegel-Hohlladung ist so gestaltet, daß sie sich unter der Detonationswirkung zu einem länglichen Projektil verformt; sie verringert also ihren Querschnitt, was zu einer Erhöhung der Impulsdichte führt.

Die Spitzkegel-Hohlladung schließlich zeichnet sich durch eine Belegung aus, die nach der Beschleunigung durch die Detonation „kollapsiert", wobei ein Teil der Belegung seinen ursprünglichen Impuls in großem Umfang an den Rest abgibt. Diese Restbelegung hat dann bei kleinem Querschnitt eine extrem hohe Geschwindigkeit, also eine sehr günstige Impulsdichte.

Die wichtigsten Merkmale und Eigenschaften dieser Ladungen, unter denen die Spitzkegel-Hohlladung die verbreitetste ist, sollen im folgenden angegeben werden.

Historisch gesehen, läßt sich die Hohlladung bis auf den Monroe-Effekt zurückverfolgen, zu dem es aber wahrscheinlich noch Vorläufer gibt. MONROE fand 1888, daß der Abdruck der senkrecht gegen eine Stahlplatte detonierenden zylindrischen Sprengstoffladung wesentlich tiefer ist, wenn die Ladung an der der Stahlplatte zugewandten Stirnseite eine kegelförmige Ausnehmung hat. In den dreißiger Jahren dieses Jahrhunderts wurde dann in Deutschland [27] und den USA [28] die Auskleidung der Oberfläche des konischen Hohlraumes der Ladung entdeckt. Wenn die Ausnehmung mit festen Werkstoffen, vorzugsweise Kupfer, Silber oder Gold von 1 bis 2 mm Wandstärke belegt ist, dann kann die bei der Sprengung erzeugte Lochtiefe gegenüber der Monroe-Ladung um ein Vielfaches gesteigert werden. Diese Entdeckung führte zu ausgedehnten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, deren Ergebnis die heute vorliegende Vielzahl von panzerbrechenden Wirkteilen bei Projektilen unterschiedlichster Art ist.

Als Auskleidungs- (Einlage-) Formen sind bei rotationssymmetrischen Hohlladungen Kalotten, flaschenförmige Geometrien und gerade Kegel verwendet worden. Heute haben im wesentlichen die geraden Kegel mit einem Öffnungswinkel $< 90^{\circ}$ Bedeutung. Das Kegelmaterial ist Kupfer, das zum Schutz gegen Korrosion verzinkt oder cadmiert wird.

Den prinzipiellen Aufbau einer Spitzkegel-Hohlladung zeigt Bild 120.

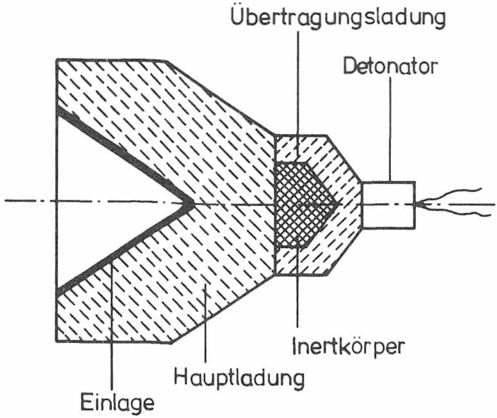


Bild 120. *Spitzkegel-Hohlladung, prinzipieller Aufbau.*

Der Einlagekegel ist von der Hauptladung, die vorzugsweise aus TNT/Hexogen oder TNT/Oktogen besteht, umgeben. Daran schließt sich die Übertragungsladung und der Detonator an. Zur optimalen Lenkung der Detonationswelle wird häufig in die Ladung ein Inertkörper mit geringer Schallgeschwindigkeit oder starker Stoßdämpfung eingefügt.

Die Auslegung der Ladung im einzelnen ist jeweils an die gegebenen Forderungen hinsichtlich Gewicht und Außenmaßen anzugleichen.

Die Wirkungsweise der Hohlladungen sei anhand von Bild 121 erläutert, das eine schematisierte Momentaufnahme darstellt.

Unter der Wirkung der streifend einfallenden Detonationswelle werden die Einlageelemente bei einem Druck von mehr als 10^5 bar so beschleunigt, daß sie in der Ladungsachse zusammentreffen. Die von der Detonation erfaßten Einlagebereiche sind nahezu geradlinig abgeknickt und bilden mit der Ladungsachse den Winkel β, der über die gesamte Ladungsentwicklung praktisch konstant ist, wie u.a. TRINKS aus Röntgenblitzaufnahmen nachweisen konnte. Die in der Mitte der Ladung zusammenschlagenden Einlageelemente teilen sich nun auf in den Stachel, der mit Geschwindigkeiten von bis zu 10^5 m/s aus dem Ladungshohlraum austritt, und den Stößel, der nur einige 10^2 m/s Geschwindigkeit in der gleichen Richtung hat. Die panzerbrechende Wirkung der Ladung wird von dem Stachel hervorgerufen, der Stößel trägt dazu nicht bei.

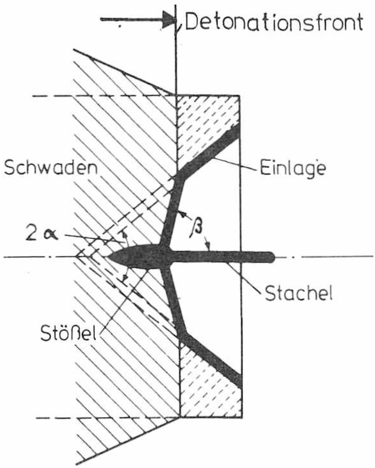


Bild 121. *Zur Wirkungsweise der Hohlladung.*

Die Erklärung für die Impulsaufteilung beim „Kollaps" der Einlageelemente wurde durch BIRKHOFF u.a. [29] aufgrund hydrodynamischer Überlegungen gegeben. Dabei wird eine konstante Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Kollapspunktes vorausgesetzt, d.h. der Vorgang ist in bezug auf diesen Punkt stationär. Dann fließen die Einlageelemente in den Kollapspunkt ein und teilen sich so auf, daß der Gesamtimpuls erhalten bleibt.

Die Ergebnisse dieser Theorie stimmen mit experimentellen Werten recht gut überein. Das sollte jedoch nicht zu der falschen Meinung führen, als ob das Einlagematerial z.B. im Stachel (früher auch als Strahl, in der angelsächsischen Literatur „jet", bezeichnet) im flüssigen oder gar gasförmigen Zustand vorläge.

Die wichtigen Formeln für die Hohlladung werden nachfolgend – bezogen auf eine ebene Geometrie – angegeben. Für die rotationssymmetrische Geometrie zeigen die Zusammenhänge eine ähnliche Tendenz, sind jedoch komplizierter.

Die Geschwindigkeiten ergeben sich zu

$$v_{Stachel} = D\,\frac{\sin(\beta-\alpha)}{\cos\alpha}\left[\frac{1}{\sin\beta} + \cot\beta + \tan\frac{1}{2}(\beta-\alpha)\right] \quad (43)$$

und

$$v_{Stößel} = D\,\frac{\sin(\beta-\alpha)}{\cos\alpha}\left[\frac{1}{\sin\beta} - \cot\beta - \tan\frac{1}{2}(\beta-\alpha)\right] \quad (44)$$

mit D als Detonationsgeschwindigkeit des Sprengstoffes.

Die Massen berechnen sich zu

$$m_{Stachel} = \frac{1}{2} m (1 - \cos \beta) \tag{45}$$

und

$$m_{Stößel} = \frac{1}{2} m (1 + \cos \beta) \tag{46}$$

mit m als Gesamtmasse der Einlage.

In diesen Formeln ist der Winkel β nur durch Röntgenblitzaufnahmen zugänglich; der Differenzwinkel $\beta - \alpha$ variiert um $10^\circ \leqslant \beta - \alpha \leqslant 20^\circ$. Mit β wird der Beschleunigungsvorgang der Belegung durch den detonierenden Sprengstoff beschrieben. Nach Gleichung (45) und (46) ergibt sich bei $\beta = 40^\circ$

$$m_{Stachel}/m_{Stößel} = 0{,}13.$$

Bei rotationssymmetrischen Hohlladungen ist das Massenverhältnis auf Kosten der mittleren Stachelgeschwindigkeit, die geringer ist, als sich nach Gleichung (43) errechnet, größer.

Die hydrodynamische Betrachtungsweise ist auch auf den Eindringungsvorgang des Stachels im Zielmaterial angewandt worden; siehe Bild 122. Der mit der Geschwindigkeit $v_{Stachel}$ auf das Zielmaterial auftreffende Hohlladungsstachel verdrängt dieses Material und verbraucht sich dabei. Der Lochboden wandert mit der Geschwindigkeit u in das Ziel. Diese Lochbodengeschwindigkeit wird wieder als konstant, der Eindringungsvorgang also als stationär angenommen.

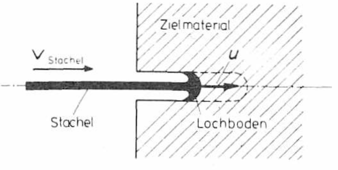


Bild 122. *Zum Eindringvorgang des Stachels.*

Dann strömt für den mit dem Lochboden bewegten Beobachter das Zielmaterial von rechts mit u und das Stachelmaterial von links mit $v_{Stachel} - u$ zusammen. Für den Staudruck am Lochboden gilt also

$$\frac{1}{2}\rho_{Stachel}(v_{Stachel} - u)^2 = \frac{1}{2}\rho_{Ziel}u^2, \qquad (47)$$

wobei $\rho_{Stachel}$ die Dichte des Stachelmaterials und ρ_{Ziel} die des Zielmaterials ist. Nach Gleichung (47) führen Kupfer als Einlagematerial und Stahl als Zielmaterial je nach Stachelgeschwindigkeit zu Lochbodengeschwindigkeiten von 2500 m/s < u < 3000 m/s. Dieser Wertebereich ist auch experimentell verifiziert worden. EICHELBERGER [30] hat die rechte Seite von Gleichung (47) noch durch ein additives Glied erweitert, das die Festigkeit des Zielmaterials berücksichtigt.

Die Gesamteindringtiefe T des Stachels berechnet sich nach dem hydrodynamischen Modell zu

$$T = L\left(\frac{\rho_{Stachel}}{\rho_{Ziel}}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (48)$$

mit L als Gesamtlänge des Stachels.

Mit serienmäßig hergestellten Hohlladungen moderner Entwicklung werden mehr als sechs Einlagedurchmesser Panzerstahl durchschlagen. Von besonders hochgezüchteten Versuchsladungen werden Eindringtiefen bis zu 10 Einlagedurchmessern berichtet.

An dieser Stelle sei besonders hervorgehoben, daß die Durchschlagsleistung von Hohlladungen in sehr starkem Maße von der physikalischen und geometrischen Qualität des Einlagekegels, der Homogenität der Sprengstoffladung und der guten Zentrierung aller Bauteile einschließlich der Übertragungsladung mit Detonator abhängt.

Bedingt durch die geometrischen Eigenschaften der rotationssymmetrischen Einlage – der Massenzufluß zum Kollapspunkt nimmt laufend zu – tritt hier im Stachel ein Geschwindigkeitsgradient auf, der bald nach der Stachelentstehung zu einer Auflösung in Einzelelemente führt. Wenn diese Einzelelemente in das Zielmaterial eindringen, so plastifizieren sie dort mehr Material in Richtung der Lochfortpflanzung als sie verdrängen. Da die zusätzliche Plastifizierung sich mit einer charakteristischen Geschwindigkeit vom Lochboden wegbewegt und dann abklingt, ist ein Optimum im Abstand der Stachelelemente zueinander zu erwarten, das auftritt, wenn die Vorplastifizierung durch das vorangegangene Element weit genug fortgeschritten, andererseits noch nicht abgeklungen ist.

Diese Überlegung erklärt den experimentellen Befund, wonach die maximale Durchschlagsleistung einer Hohlladung in einem bestimmten Abstand vom Ziel erreicht wird; siehe dazu Bild 123.

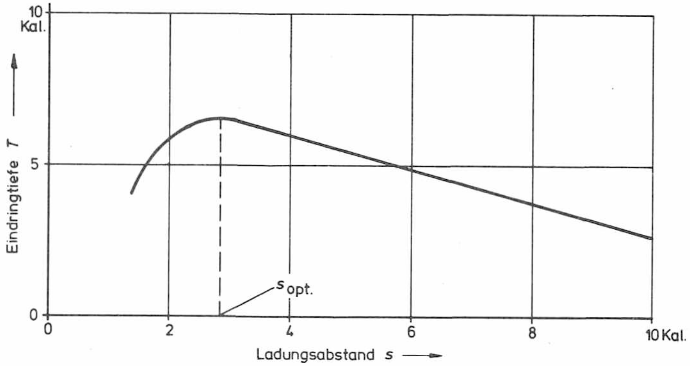


Bild 123. *Spitzkegel-Hohlladung; Abhängigkeit der Eindringtiefe T vom Ladungsabstand s.*

Die Hohlladung verliert leider ihre große Durchschlagsleistung, wenn sie rotiert. Bei Drehzahlen, wie sie zur Geschoßstabilisierung erforderlich sind, werden nur noch unbedeutende Eindringtiefen erreicht. Der Grund für dieses Verhalten liegt in der Störung des Kollapsvorganges durch Überlagerung der Radialgeschwindigkeit zur Ladungsachse hin mit der rotationsbedingten Tangentialgeschwindigkeit. Bemühungen, die Tangentialgeschwindigkeit durch besondere Formgebung der Einlage („Stufenkegel") zu kompensieren, waren bisher nur bedingt erfolgreich.

So werden Spitzkegel-Hohlladungen ohne Drall oder nur mit sehr geringem Drall verschossen. Eine Ausnahme bildet das Gessner-Geschoß, bei dem die Hohlladung in einem drallstabilisierten Geschoß durch Kugellager aufgenommen ist, so daß sie nicht mit rotiert.

Um den Nachteil der starken Drallabhängigkeit der Durchschlagsleistung bei den Spitzkegel-Hohlladungen zu vermeiden, wurden sogenannte *Flachkegel-Hohlladungen* entwickelt. Auf diesem Gebiet konnte Rheinmetall in den letzten Jahren durch ausgedehnte Forschungsarbeiten wichtige Beiträge leisten [31].

Bei der Flachkegel-Hohlladung besteht die Einlage aus einem Kegel von 130 bis 140° Öffnungswinkel. Die Wandstärke ändert sich über dem Radius von der Mitte her zunehmend (progressive Einlage) oder abnehmend (degressive Einlage). Von praktischer Bedeutung ist insbesondere die progressive Einlage, wie sie in Bild 124 dargestellt ist.

Unter der Wirkung der detonierenden Sprengstoffsäule werden die Einlageelemente beschleunigt. Die zentralen Bereiche werden von der

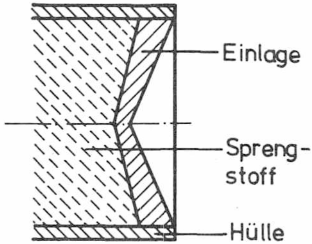


Bild 124. *Die progressive Einlage der Flachkegel-Hohlladung.*

Detonationsfront zuerst getroffen und erhalten aufgrund der geringsten Dicke die größte Geschwindigkeit. Sie eilen also den übrigen Einlageelementen voraus. Aufgrund des Kegelwinkels erhalten die außermittigen Elemente eine Impulskomponente zur Mitte. Die Geschwindigkeit nimmt zum Rande hin kontinuierlich ab. Durch den Geschwindigkeitsgradienten und die Bewegung der Ladung zur Mitte hin entsteht ein langgestrecktes Projektil mit dem Zentralbereich der Einlage in der Spitze und den Randpartien am Ende. Praktisch die gesamte Masse der Einlage findet sich im Projektil wieder. Die Geschwindigkeit der Projektilspitze erreicht bei gut dimensionierten Ladungen Werte über 4000 m/s. Am Ende des Projektils werden 1300 bis 1700 m/s gemessen.

Der Geschwindigkeitsgradient führt nach einer gewissen Flugstrecke zur Auflösung des Projektils, die für die Durchschlagsleistung nachteiligt ist. Andererseits sollte eine weitgehende Streckung erreicht werden. Deshalb gibt es für Flachkegel-Hohlladungen, ähnlich wie bei den Spitzkegel-Hohlladungen, einen für die Durchschlagsleistung optimalen Abstand vom Ziel.

Die Durchschlagsleistung im Stand ohne Rotation beträgt bei Flachkegel-Hohlladungen etwa 3,5 Einlagedurchmesser.

Wegen des anderen Bildungsmechanismus des wirksamen Teiles der Ladung ist die Flachkegel-Hohlladung wesentlich weniger drallabhängig als die Spitzkegel-Hohlladung. Wie bei beiden Ladungsarten die Durchschlagsleistung in Kalibern mit der Umfangsgeschwindigkeit U abnimmt, zeigt Bild 125.

Man erkennt, daß von U = 25 m/s an der flache Kegel dem spitzen überlegen ist. Da für drallstabilisierte Geschosse U > 25 m/s ist, liegt hier der Anwendungsbereich der Flachkegel-Hohlladung.

Zu der Projektilgeschwindigkeit im Stand überlagert sich wegen des insgesamt geringeren Betrages noch zu einem merklichen Anteil die Geschoßgeschwindigkeit vor dem Ziel v_Z. So lassen sich bei drallstabilisierten Mehrzweck-Geschossen (Panzerdurchschlag und Splitter-

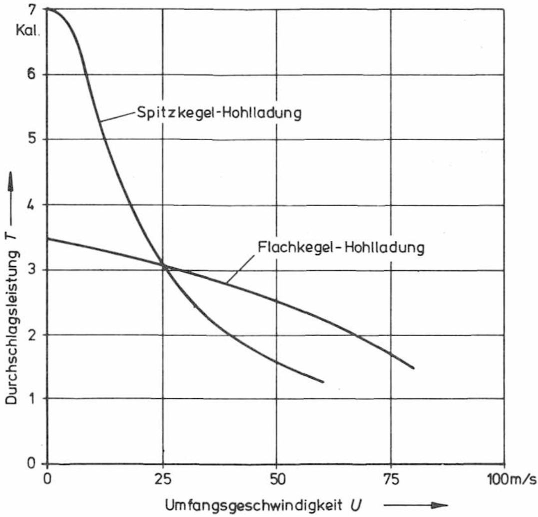


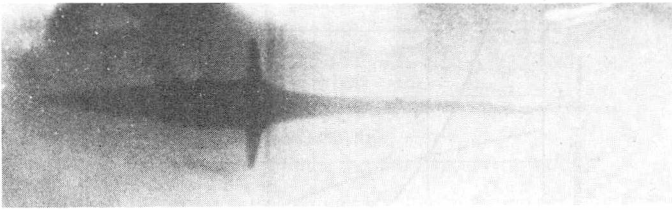
Bild 125. *Die Abhängigkeit der Durchschlagsleistung rotierender Hohlladungen von der Umfangsgeschwindigkeit.*

wirkung), wo leicht der größte Geschoßquerschnitt für die Einlage ausgenützt werden kann, Durchschlagsleistungen in Panzerstahl von *zwei Geschoßkalibern* ziemlich unabhängig von der Kampfentfernung mit Sicherheit erreichen. Die Austrittsöffnung des durchgeschlagenen Loches und die Wirkung hinter der Platte sind größer als bei der Spitzkegel-Hohlladung.

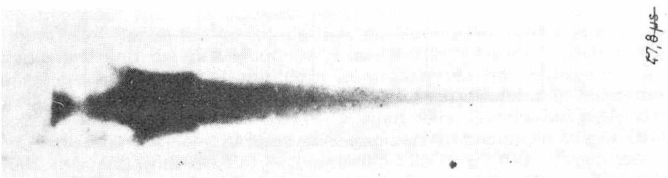
Abschließend zur Flachkegel-Hohlladung seien noch zwei Einzelheiten erwähnt: Zur Steigerung der Durchschlagsleistung, insbesondere auch bei rotierenden Ladungen, wird vor der Einlage eine metallische Düse angebracht. Außerdem sollte die Ladung im Bereich der Einlage seitlich hinreichend verdämmt sein.

Sprengstoffbeschleunigte Geschosse bestehen aus Platinen verschiedener Metalle, die wie die Hohlladungseinlagen vorzugsweise stirnseitig auf Sprengstoffladungen aufgebracht werden. Neben unterschiedlicher militärischer Anwendung haben entsprechende Ladungen Bedeutung für die Hyperschallforschung. Es lassen sich mit stabilen Projektilen Geschwindigkeiten zwischen 2000 und 6000 m/s darstellen, mit denen u.a. Meteoriteneinschläge in Satelliten simuliert werden.

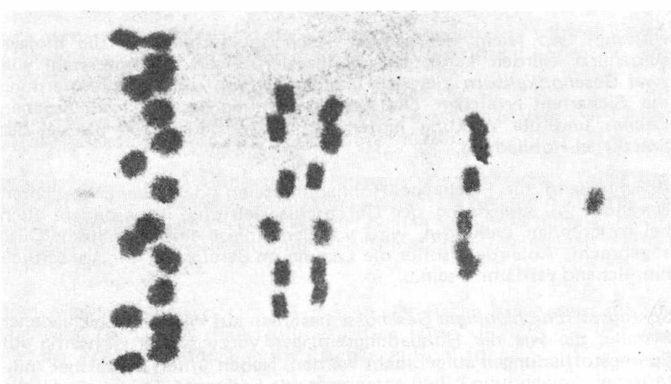
Ein wichtiges Hilfsmittel bei der Untersuchung von Hohlladungen sind Röntgenblitzanlagen; in Bild 126 werden je eine Röntgenblitzaufnahme von einer Spitzkegel-, einer Flachkegel-Hohlladung ,und von sprengstoffbeschleunigten Projektilen gezeigt.



Spitzkegel-Hohlladung



Flachkegel-Hohlladung



Sprengstoffbeschleunigtes Projektil

Bild 126. *Röntgenblitzaufnahmen von Hohlladungen.*

1.5. Pyrotechnische Sätze

Zu den Explosivstoffen sind, wie unter 1.2 angeführt, auch die pyrotechnischen Sätze zu zählen, von denen nachfolgend einige von militärischer Bedeutung beschrieben werden. Eine ausführliche Darstellung findet sich in dem Buch von ELLERN [32].

1.5.1. Leuchtsätze

Bei den Leuchtsätzen ist zu unterscheiden zwischen Sätzen für Leuchtspuren und solchen für Leuchtgeschosse zur Kampffeldbeleuchtung (Sterne).

Leuchtspursätze haben je nach Farbe der Flamme folgende Zusammensetzung:

Weiß:	Bariumnitrat	65 Gew. %
	Al-Pulver	20 Gew. %
	Schwefel	12 Gew. %
	Binder	3 Gew. %
Rot:	Kaliumchlorat	65 Gew. %
	Strontiumoxalat	26 Gew. %
	Binder	9 Gew. %
Gelb:	Kaliumnitrat	28 Gew. %
	Natriumoxalat	28 Gew. %
	Magnesium-Pulver	42 Gew. %
	Binder	2 Gew. %
Grün:	Bariumchlorat	86 Gew. %
	Binder	14 Gew. %

Diese Rezepturen sind nur Beispiele, die sich durchaus variieren lassen. Für die Lichtleistung ist die Korngröße der eingebrachten Komponenten wichtig. Die enthaltenen Metallsalze werden angeregt und die erzeugten Metallionen emittieren ein im sichtbaren Bereich liegendes charakteristisches Licht.

Sternsätze basieren auf der Oxidation von Aluminium- und/oder Magnesiumpulver. Als Oxidatoren werden Peroxide, Nitrate, Chlorate oder Perchlorate der Alkali- oder Erdalkalimetalle verwendet. Metallpulver und Oxidator werden mit einem Binder versetzt und gepreßt. Die Beurteilungskriterien für Sternsätze sind die oberflächenspezifische Lichtleistung und die Brenndauer.

Da Sternsätze erhebliche mechanische Beanspruchung erfahren (Geschoßbeschleunigung und Ausstoß), ist auch auf gute Festigkeitseigenschaften zu achten.

Als Anfeuerungssatz für Leuchtspuren und auch für Sternsätze hat sich die Zusammensetzung:

Kaliumnitrat	59 Gew. %
Bariumnitrat	10 Gew. %
Schwefel	15 Gew. %
Holzkohle	6 Gew. %
Aluminium-Pyroschliff	6 Gew. %
Dextrin	4 Gew. %

bewährt, der ohne leuchtende Flamme abbrennt (Dunkelspur).

1.5.2. Rauch- und Nebelsätze

Rauch- und Nebelsätze erzeugen feinverteilte Aerosole aus Oxiden oder Chloriden. Auch Zusätze von Farbstoffen sind bekannt. Rauchsätze werden zur Markierung und Nebelsätze zur Sichtbehinderung vor eigenen oder in feindlichen Stellungen verwendet.

Als Zusammensetzungen für Rauchsätze finden häufig Anwendung:

Kaliumchlorat	33 Gew. %
Tylose	3 Gew. %
Sudanorange	30 Gew. %
Sudanblau	9 Gew. %
Milchzucker	22 Gew. %
Kieselgur	3 Gew. %

und

Kaliumnitrat	52 Gew. %
Schwefel	11 Gew. %
Holzkohle	7 Gew. %
Zinkschliff	30 Gew. %

Bei Nebelsätzen wird durch Umlagerung des Chlors von Chlorparaffinen vorzugsweise Zinkchlorid freigesetzt. Die klassische „Berger-Mischung" besteht aus Hexachloräthan, Zinkstaub und Zinkoxid.

Außerdem ist ein sogenannter Kaltnebelsatz folgender Zusammensetzung bekannt:

Roter Phosphor	10 Gew. %
Kaliumnitrat	30 Gew. %
Ammoniumchlorid	60 Gew. %

Das erzeugte Aerosol besteht hier aus Phosphorpentoxid und verdampftem Ammoniumchlorid.

1.5.3. Knallsätze

Zur akustischen Darstellung von Abschüssen oder Einschlägen z.B. in Manövern findet Munition mit Knallsätzen Verwendung, bei denen es auf eine schnelle exotherme Umsetzung zur Erzeugung einer Stoßwelle in der Luft ankommt. Aus der Vielfalt möglicher Rezepturen sei hier folgende Mischung angeführt:

Kaliumperchlorat	75 Gew. %
Aluminium-Pulver	25 Gew. %

1.5.4. Brandsätze

Pyrotechnische Sätze in Brandmunition sind nach zweierlei Wirkung zu unterscheiden: Sie können brennbares Material im Ziel entzünden oder selbst den Brennstoff darstellen.

Für die Zündung von Bränden kommt es auf eine räumlich begrenzte Erzeugung hoher Temperaturen an. Hierzu eignen sich Sätze aus Oxydatoren mit Aluminium oder Magnesium, Thermitsätze (Eisenoxid und Al-Pulver) und Phosphor.

Größere Mengen von *weißem Phosphor* sind auch als Brennstoff im Sinne der getroffenen Unterscheidung anzusprechen; die Wirkung dieses Brandmittels ist ebenso verheerend wie die von Napalm, das in jüngerer Zeit häufig eingesetzt wird. *Napalm* ist mit Aluminiumseifen gelatiniertes Benzin (90 bis 95 %).

1.5.5. Sonstige Sätze

Neben den erwähnten Sätzen sind in den letzten Jahren Stoffmischungen untersucht worden, die sich gasfrei umsetzen und sehr hohe Temperaturen entwickeln. Solche Mischungen sind z.B.

Magnesium/Tellur,
Titan/Antimon/Blei,
Silizium/Bleimennige (Pb_3O_4).

Diese Stoffe werden in der Literatur als Koruskative bezeichnet. Sie eignen sich u.a. als Infrarot-Leuchtsätze oder zur Anfeuerung von Treibladungen, wenn hier gaserzeugende Anfeuerungssätze unerwünscht sind.

Literatur

[1] Stettbacher, A.: Spreng- und Schießstoffe. Zürich 1948.

[2] Behrens, H.: Grundlagen der Entwicklung neuer Raketentreibmittel in den USA. Wehrt. Monatsh. 55 (1958), Seite 344—354.

[3] Sarner, S. F.: Propellant Chemistry. New York 1966.

[4] Dadieu, A.; Damm, R.; Schmidt, E. W.: Raketentreibstoffe. Wien 1968.

[5] Rocketdyne: Theoretical Performance of Rocket Propellant Combinations. Firmenschrift.

[6] Berthmann, A.: Explosivstoffe. Winacker-Küchler, Chemische Technologie, Bd. 4. München 1960.

[7] Treumann, H.: Explosive Stoffe. Hütte, Taschenbuch der Werkstoffkunde, 4. Aufl., S. 1251—1259.

[8] Urbanski, T.: Chemie und Technologie der Explosivstoffe. Leipzig 1961.

[9] Corner, J.: Theory of the Interior Ballistics of Guns. New York 1950.

[10] Cranz, C.: Lehrbuch der Ballistik, Bd. II. Berlin 1926.

[11] Spengler, G.; Büchner, E.: Brennstoff-Chemie 44 (1963), S. 217.

[12] Muraour, H.; Aunis, G.: Explosivstoffe 2 (1954), S. 154.

[13] Kutterer, R.E.: Ballistik. 3. Aufl., Braunschweig 1959.

[14] Kast, H.; Metz, L.: Chemische Untersuchung der Spreng- und Zündstoffe. 2. Aufl., Braunschweig 1944.

[15] Schmitz, O.: Artl. Monatsh. 84 (1913), S. 489; 86 (1914), S. 85.

[16] Wasag-Chemie AG: Explosivstoffe. 1961, Firmenschrift.

[17] Holston Army Ammunition Plant, Technical Data AD 665 624; April 1965.

[18] Koenen, H.; Ide, K.H.; Swart, K.-H.: Explosivstoffe 9 (1961), S. 4, S. 30.

[19] Ide, K. H.; Haeuseler, E.; Swart, K.-H.: Explosivstoffe 9 (1961), S. 195.

[20] Chapman, D. L.: Phil. Mag. 47 (1899), S. 90.

[21] Jouguet, E.: Journ. d. Math. 1 (1905), S. 347.

[22] Becker, R.: Stoßwelle und Detonation. Z. f. Physik 8 (1922), S. 321—362.

[23] Hänsel, H.: Wehrt. Monatsh. 60 (1963), S. 97—107, S. 272—278.

[24] Lindeijer, E.W.; Leemans, J.S.: Explosivstoffe 16 (1968), S. 145—151.

[25] Held, M.: Explosivstoffe 15 (1967), S. 265; 16 (1968), S. 49.

[26] Molitz, H.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik mit ihren Anwendungen in der Ballistik. Weil, CCG-Kurs, 11.2.1970.

[27] Trinks, W.: Rechnerische Untersuchungen über die Abhängigkeit der Wirkung verkleideter Hohlsprengkörper von ihren Bestimmungsgrößen. Bericht des Bevollmächtigten für Sprengstoffphysik 43/6.

[28] Cook, M.A.: The Science of High Explosives. New York 1966.

[29] Birkhoff, D.P.; Mac Dougall; Pugh, E.M.; Taylor, Sir G.: Explosives with Lined Cavities. Journ. Appl. Phys. 19 (1948), S. 563–582.

[30] Eichelberger, R. J.: Journ. Appl. Phys. 27 (1956), S. 63.

[31] DBP 1 137 351, Drallstabilisiertes Hohlladungsgeschoß, DBP 1 234 584, Drallstabilisiertes Hohlladungsgeschoß mit Einlage.

[32] Ellern, H.: Military and Civilian Pyrotechnics. New York 1968.

[33] Glasstone, S.: The Effects of Nuclear Weapons. Washington 1962. Deutsche Übersetzung: Leutz, H.: Die Wirkungen der Kernwaffen. Köln 1964.

2. Innere Ballistik

Die innere Ballistik hat den Antrieb von Projektilen zum Gegenstand, wie er in der Rohrwaffe durch den auf den Geschoßboden wirkenden Gasdruck oder bei der Rakete durch den rückwärtigen Austritt eines Gasstrahls erfolgt.

Die dem Projektil übertragene kinetische Energie oder die gegen eine äußere Kraft, wie z.B. den Luftwiderstand bei Raketen, zu leistende Arbeit wird im allgemeinen durch die exotherme Reaktion von festen oder flüssigen chemischen Treibmitteln aufgebracht. Insofern sind insbesondere die Rohrwaffen zu den Wärmekraftmaschinen zu rechnen.

Bei den Raketen für Weltraumprojekte spielen neben chemischen Antrieben zunehmend auch elektrische und Kernenergie-Antriebe eine Rolle.

Die Aufgabe der inneren Ballistik ist es, den Ablauf des Antriebsvorganges in der Rohrwaffe oder Rakete zu berechnen, d.h. entweder bei vorgegebenen Parametern des innenballistischen Systems die Geschwindigkeit und den Gasdruck theoretisch zu ermitteln oder die Systemparameter aufgrund einer Forderung für Gasdruck und Geschwindigkeit festzulegen.

Im folgenden wird zunächst eine Übersicht über die Berechnung von Rohrwaffen gegeben und anschließend einiges über die Auslegung von Raketenantrieben ausgeführt.

2.1. Innere Ballistik der Rohrwaffen

Der Vorgang der Schußentwicklung ist recht komplex, da mit den thermodynamischen und gasdynamischen Vorgängen auch komplizierte reaktionskinetische Abläufe der Umsetzung der Treibmittel in heiße Gase gekoppelt sind. Wenn es dennoch gelingt, innenballistische Systeme so zu berechnen, daß die theoretischen Ergebnisse in brauchbarer Übereinstimmung mit den entsprechenden Experimenten sind, so ist das möglich, weil sich in der Praxis die gasdynamischen Aspekte im allgemeinen vereinfacht zusammenfassen und die Kinetik der Pulverumsetzung durch empirische Formeln beschreiben lassen.

Die Ansätze zur mathematischen Beschreibung der innenballistischen Vorgänge gehen zurück auf RÉSAL (1864), SARRAU (1876), SÉBERT und HUGONIOT (1882), LIOUVILLE (1895) und CHARBONNIER (1908). Halbempirische Berechnungsverfahren sind von VALLIER (1899) und HEYDENREICH (1900) angegeben worden. Seither ist eine große Zahl von Veröffentlichungen über innenballistische Probleme erschienen, wobei heute die gasdynamischen Fragen überwiegen.

2.1.1. Der Aufbau einer Rohrwaffe

Für das Verständnis der weiteren Ausführungen dieses Kapitels ist es zweckmäßig, anhand des innenballistischen Aufbaus von Rohrwaffen die verwendeten Begriffe kurz zu erläutern. Auf ausführlichere Beschreibungen in diesem Buch wird an den entsprechenden Stellen hingewiesen.

An einer Waffe interessieren hier

- das Rohr mit Verschluß,
- das Geschoß und
- die Treibladung mit Anzündelement und Anfeuerung.

In Bild 201 ist ein geladenes Rohr schematisch dargestellt. Es besteht aus einem gezogenen oder auch glatten Teil, in dem sich das Geschoß unter der Wirkung des Gasdrucks nach vorn bewegt; dieser Teil des Rohres entspricht dem Geschoßweg. Der Innendurchmesser über dem Geschoßweg ist das Kaliber des Rohres; es wird bei gezogenen Rohren über den Feldern gemessen (s. Bild 1136). Nach hinten schließt sich der Ladungsraum an, dessen Durchmesser in der Regel größer ist als der Kaliberdurchmesser. Der Übergang vom Ladungsraum zum gezogenen Teil ist kegelförmig ausgeführt und wird Übergangskegel genannt.

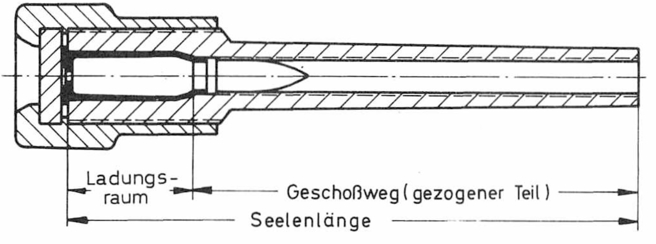


Bild 201. *Schematische Darstellung eines geladenen Rohres.*

Die Außenform des Rohres legt der Rohrkonstrukteur aufgrund des an der jeweiligen Stelle des Rohres auftretenden maximalen Gasdrucks unter Berücksichtigung der Festigkeit des verwendeten Werkstoffes fest (s. auch Kap. 8, Geschütze).

Den hinteren Abschluß des Rohres bildet der Verschluß, der je nach Art der zu verschießenden Munition verschieden ausgeführt wird und so auszulegen ist, daß der maximale bei der Schußentwicklung auf ihn

wirkende Gasdruck aufgenommen wird. Bei Patronenmunition mit Hülsen aus metallischen Werkstoffen übernehmen diese die Abdichtung des Rohres im Bereich des Verschlusses; bei Patronen mit verbrennbarer Hülse oder bei getrennter Munition mit Beutelkartuschen o.ä. ist am Verschluß eine besondere Dichtung (Ringliderung, plastische Liderung) vorzusehen (s. Abschnitt 8.1.2.5, Liderungen).

Die in das Rohr eingebrachte Munition besteht aus dem Geschoß sowie der Treibladung mit Anfeuerung und Anzündelement. Bei Patronenmunition ist die Treibladung einschließlich Anfeuerung und Anzündelement in einer Hülse untergebracht, mit der das Geschoß durch Würgen oder Kleben verbunden ist. Bei getrennter Munition sind Treibladung und Anfeuerung zusammen in Beutelzeug eingenäht oder anderweitig zusammengehalten, und das Anzündelement wird gesondert in eine Aufnahme im Verschluß geladen (vgl. Kap. 11, Munition).

Die Abdichtung zwischen Geschoß und Rohr erfolgt bei gezogenen Rohren durch das Führungsband, das gleichzeitig den Drall auf das Geschoß überträgt. Glatte Rohre werden durch ringförmig um das Geschoß angebrachte Bänder verschiedenster konstruktiver Ausführung abgedichtet (vgl. Kap. 11, Munition).

Über den Drall, die Drallarten, die Leistenkraft (d.i. die Führungskraft, die bei der Drallübertragung auf das Geschoß an dessen Umfang im Bereich der Führungsbänder auftritt), über die für die Dimensionierung der Züge und der Führungsbänder maßgebende Flächenpressung an der Zugflanke sowie über die Reibungsarbeit der Führungsbänder ist Näheres unter Abschnitt 11.5, Die Beanspruchung der Geschosse beim Abschuß, ausgeführt.

Um beim Laden getrennter Munition die für einen reproduzierbaren innenballistischen Ablauf erforderliche Konstanz der Verbrennungsraumlänge zu erreichen, sind Rohr und Geschoß so auszubilden, daß das Geschoß immer in einer definierten Lage angesetzt werden kann.

2.1.2. Der Vorgang der Schußentwicklung

Die Schußentwicklung läuft in folgender Weise ab: Nach dem Laden der Munition und dem Schließen des Verschlusses wird das Anzündelement durch einen mechanischen Schlag oder eine elektrische Spannung zum Ansprechen gebracht. Der im Anzündelement freigesetzte Strahl heißer Partikel entzündet die Anfeuerungsladung, deren Aufgabe es ist, die Anzündung auf der gesamten Oberfläche des Treibladungspulvers möglichst gleichzeitig einzuleiten (vgl. Kap. 13, Zünder).

Der Zeitbedarf vom Auftreffen des Schlagbolzens auf das Anzündelement oder von der Auslösung der elektrischen Anzündung bis zum Beginn der Umsetzung des Treibladungspulvers liegt bei kleinkalibrigen

Waffen unter einer Millisekunde und erreicht bei größeren Kalibern Werte von mehreren 10 Millisekunden. Wenn der Anzündvorgang eine längere Zeit beansprucht, ist das ein Hinweis auf eine unzureichende Anfeuerungsladung, die eine Vergrößerung der Streuung der ballistischen Werte zur Folge hat.

Die Anfeuerung des Treibladungspulvers kann je nach Wahl der Zusammensetzung der Anfeuerungsladung durch heiße Gase (Druckzündung) oder durch Emission heißer Korpuskeln (Flammenzündung) erfolgen. Welche Art der Anfeuerung gewählt wird, hängt von der Art des Treibladungspulvers, dem möglichen Ladungsaufbau und anderen Gesichtspunkten, wie Waffenverschmutzung usw., ab.

Wenn die Treibladung angezündet ist, beginnt sie sich in gasförmige Produkte, die sogenannten Schwaden umzusetzen, die je nach den chemischen Bestandteilen Temperaturen von 2000 bis 4000 K besitzen. (Das gilt für die heute als Treibladung mit wenigen Ausnahmen ausschließlich verwendeten rauchschwachen Pulver; beim Schwarzpulver z.B. bestehen die Umsetzungsprodukte teilweise auch aus festen Stoffen. Auf die chemische Zusammensetzung der Pulver und ihr Abbrandverhalten wird in Kap. 1, Explosivstoffe, eingegangen.) Der von den heißen Pulvergasen zwischen Rohrverschluß und Geschoßboden erzeugte Gasdruck treibt nun das Geschoß an, so daß dieses bis zum Austritt an der Rohrmündung zunehmend an Geschwindigkeit gewinnt. Die charakteristische Form des Druckverlaufs im Rohr wird dabei bis zur vollständigen Umsetzung des Pulvers durch folgende gegenläufige Vorgänge bestimmt:

Die Umsetzungsgeschwindigkeit des Pulvers nimmt mit wachsendem Druck stark zu, was zu weiterer Druckerhöhung führt.

Unter dem Einfluß des Drucks nimmt das Geschoß kinetische Energie auf, die den Pulvergasen entzogen wird, was zu einer Druckverringerung führt; gleichzeitig wird mit der Bewegung des Geschosses das den Pulvergasen zur Verfügung stehende Volumen größer, was zu einer weiteren Druckverringerung führt.

Daher steigt im Normalfall der Gasdruck im Rohr über dem Geschoßweg bis zu einem maximalen Wert an und fällt dann wieder ab, bis das Ende der Pulverumsetzung erreicht ist (Bild 202a). Es sind jedoch auch Fälle möglich, in denen das Pulver vollständig umgesetzt ist, bevor ein echtes Maximum im Druckverlauf erreicht wurde (Bild 202b). Nach beendeter Pulverumsetzung fällt der Druck monoton entsprechend einer polytropischen Expansion ab.

Bei der Auslegung der inneren Ballistik eines zu projektierenden Rohres ist auf jeden Fall darauf zu achten, daß durch entsprechende Wahl der Parameter der Pulverabbrand möglichst weit vorn im Rohr endet. Der eigentliche Antriebsvorgang des Geschosses dauert einige Millisekunden; es treten dabei Beschleunigungen bis zu 10^5 g auf. Die Mündungsgeschwindigkeit kann für militärische Anwendungen Werte über 1500 m/s erreichen bei maximalen Gasdrücken von über 5000 bar.

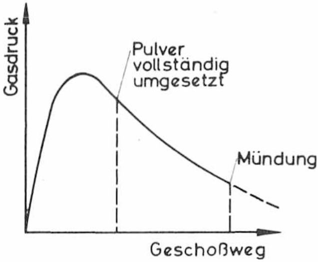


Bild 202a.
Ende der Pulverumsetzung n a c h Erreichen des Druckmaximums.

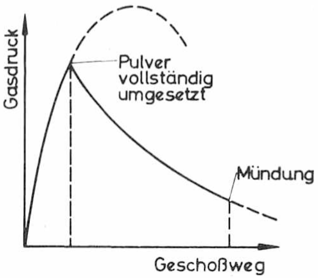


Bild 202b.
Ende der Pulverumsetzung v o r Erreichen des Druckmaximums.

Zur Beherrschung eines innenballistischen Systems ist neben Berechnungen mit Hilfe theoretischer Ansätze eine möglichst weitgehende meßtechnische Erfassung aller Vorgänge unabdingbar. Einzelheiten hierzu finden sich in Kap. 14, Ballistische und waffentechnische Meßverfahren. Neben der Messung der Mündungsgeschwindigkeit spielt die Gasdruckmessung eine besondere Rolle. Hier steht zum einen das Verfahren der Stauchung von Probekörpern durch den Gasdruck zur Verfügung, mit dem ein Vergleichswert für den maximalen Gasdruck gewonnen wird. Wegen seiner Einfachheit und geringen Störanfälligkeit findet das Stauchkörperverfahren insbesondere bei der Abnahme von Liefermunition Verwendung. Bei Entwicklungsarbeiten hingegen wird der Gasdruck meist mit piezoelektrischen Gebern gemessen, durch die der Gasdruckverlauf über der Zeit beispielsweise auf dem Schirm eines Kathodenstrahloszillographen dargestellt werden kann.

Einen typischen Gasdruckverlauf aus einer piezoelektrischen Registrierung zeigt Bild 203 (Triggerung beim Auftreffen des Schlagbolzens auf das Zündhütchen). In diese Abbildung sind auch die Definitionen der verschiedenen Zeitintervalle der Schußentwicklung eingetragen, wie sie vom Ballistischen Referat des Bundesamtes für Wehrtechnik und Beschaffung vorgeschlagen wurden.

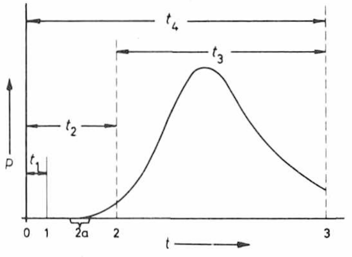


Bild 203. *Typischer Gasdruckverlauf über der Zeit und Definition der Zeitintervalle der Schußentwicklung.*

0 = Auftreffen des Schlagbolzens
1 = Druckbeginn im Zündhütchen
2a = Bereich des Druckbeginns der Hauptladung
2 = 10 % des max. Gasdrucks
3 = Geschoßaustritt

t_1 = Zündhütchenzeit
t_2 = Zündverzugszeit
t_3 = Durchlaufzeit
t_4 = Schußzeit

2.1.3. Die Energieverhältnisse beim Schuß

Die durch die Umsetzung der Treibladung freigesetzte chemische Energie teilt sich bei der Schußentwicklung im wesentlichen in folgender Weise auf:

Energie der Geschoßtranslation,

Energie der Geschoßrotation,

Energie der rücklaufenden Waffenteile,

Energie zum Antrieb automatischer Waffen (gegebenenfalls),

Strömungsenergie der Pulvergase,

Innere Energie der Pulvergase,

Erwärmung von Rohr, Geschoß und Hülse durch Reibung und Wärmeübergang,

Arbeit gegen den Ausziehwiderstand bei Patronenmunition und

Arbeit beim Einpressen des Geschosses in die Züge bei Drallgeschossen.

Der Anteil der Geschoßrotation und des Waffenrücklaufs sowie gegebenenfalls der Antriebsenergie von automatischen Waffen an der Gesamtenergie ist sehr gering (insgesamt etwa 1 %); er kann daher

vernachlässigt werden. Die Arbeit gegen den Ausziehwiderstand und gegen den Einpreßwiderstand wird bei Berechnungen im allgemeinen ebenfalls vernachlässigt. Jedoch spielen der Auszieh- und der Einpreßwiderstand für die Einhaltung der ballistischen Daten der Munition durchaus eine Rolle.

Der Energieverlust durch die Erwärmung des Rohres und der Munitionsteile bei der Schußentwicklung kann berücksichtigt werden, indem man mit polytropischer Expansion rechnet. Die Strömungsenergie der Pulvergase läßt sich durch Hinzufügen eines Anteils der Ladung (Mitführungsfaktor, Sébertscher Faktor) zu der zu beschleunigenden Geschoßmasse in der Rechnung erfassen (Näheres hierzu Abschnitt 2.1.5.2, Die Druckverteilung im Rohr). Man rechnet also, wie auch in anderen Bereichen der Physik üblich, mit einer effektiven Masse. Es ist grundsätzlich möglich, auch die Energieverluste durch Rohrerwärmung, insbesondere die Reibungsverluste, in der effektiven Masse mit zu berücksichtigen.

Von besonderem Interesse für die überschlägige Bemessung eines innenballistischen Systems ist nur der Anteil der Energie des Pulvers, der in kinetische Energie des Geschosses umgewandelt wird, also der thermische Wirkungsgrad η_{th}. Es gilt

$$\eta_{th} = \frac{m_p \, v_e^2}{2 m_c \, Q_{ex}} \quad (1)$$

Darin ist

m_p die Geschoßmasse (kg),

m_c die Treibladungsmasse (kg),

v_e die Mündungsgeschwindigkeit (m/s),

Q_{ex} die spezifische Explosionswärme (kJ/kg).

Die spezifische Explosionswärme der gebräuchlichen Pulver liegt zwischen 3000 und 5000 kJ/kg (s. Kap. 1, Explosivstoffe).

Der thermische Wirkungsgrad wird durch die innenballistischen Parameter des Systems bestimmt. Für η_{th} werden je nach maximalem Gasdruck und Rohrlänge Werte zwischen 0,25 und 0,45 erreicht.

Neben dem thermischen Wirkungsgrad wird für Berechnungen auch die spezifische Ladung

$$m_{cs} = \frac{m_c}{E_e} \quad (2)$$

benutzt, worin

$$E_e = \frac{m_p}{2} v_e^2 \tag{3}$$

die Mündungswucht (kinetische Energie des Geschosses an der Mündung) bedeutet. Als Anhaltswert für die spezifische Ladung kann $m_{cs} = 8 \cdot 10^{-7}$ kg/J für $v_e = 1000$ m/s gelten. Zwischen η_{th} und m_{cs} gilt die Beziehung

$$\eta_{th}\, m_{cs} = \frac{1}{Q_{ex}}. \tag{4}$$

Wenn man für die Ermittlung der beim Schuß erzeugten kinetischen Energie von der vorstehend eingeführten effektiven Masse

$$m^* = m_p + \epsilon\, m_c \tag{5}$$

ausgeht, worin ϵ der Mitführungsfaktor ist ($\epsilon \approx 0{,}5$), so erhält man eine Kennzahl, die im Hinblick auf das Nachfolgende als ζ_e bezeichnet werden soll:

$$\zeta_e = \frac{m^* v_e^2}{2 m_c\, Q_{ex}}. \tag{6}$$

Für die automatische 20-mm-Kanone MK 20 Rh 202 z. B. ist $\zeta_e = 0{,}44$.

Mit Gleichung (6) wird häufig der Grenzwert der Mündungsgeschwindigkeit abgeschätzt, der mit einer konventionellen Kanone erreicht werden kann. Setzt man den oben eingeführten Ausdruck für m^* in diese Gleichung ein, so ergibt sich

$$\zeta_e = \frac{\left(\frac{m_p}{m_c} + \epsilon\right) v_e^2}{2\, Q_{ex}}. \tag{7}$$

oder

$$v_e = \sqrt{\frac{2\, \zeta_e\, Q_{ex}}{\frac{m_p}{m_c} + \epsilon}}. \tag{8}$$

Man erkennt, daß bei sonst festgehaltenen Parametern die Mündungsgeschwindigkeit um so mehr steigt, je kleiner das Verhältnis m_p/m_c wird. Ein Grenzwert wird erreicht, wenn die Geschoßmasse gegenüber der Treibladungsmasse beliebig klein ist.

In Bild 204 ist der Verlauf der Mündungsgeschwindigkeit nach Gleichung (8) über m_c/m_p bei konstantem ζ_e und ϵ aufgetragen. Mit ζ_e = 0,46, ϵ = 0,5 und Q_{ex} = 3475 kJ/kg ergibt sich eine Grenzgeschwindigkeit von 2500 m/s.

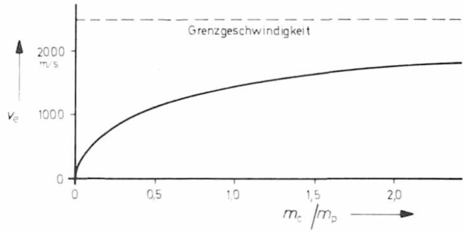


Bild 204. *Abhängigkeit der Mündungsgeschwindigkeit v_e vom Verhältnis des Ladungsgewichts m_c zum Geschoßgewicht m_p.*

Eine Grenzbetrachtung für diese Art der Abschätzung ist jedoch aus zwei Gründen unzulässig: Einmal kann man für die maximal erreichbare Geschwindigkeit nicht von Werten für ζ_e ausgehen, wie sie bei normalen Geschwindigkeiten auftreten, zum anderen ist das einfache gasdynamische Modell, das zur effektiv zu beschleunigenden Masse m* führt, gerade für eine Grenzbetrachtung nicht mehr gültig.

Von der instationären Gasdynamik ausgehend, hat H. SCHARDIN [1]

$$v_{e\,max} = \frac{2a}{\kappa - 1} \tag{9}$$

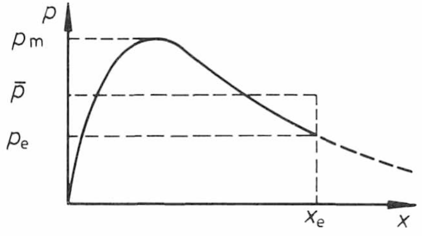
abgeleitet mit a als Schallgeschwindigkeit in den Pulvergasen. Dabei ist vorausgesetzt, daß das Geschoß die größte in den Gasen auftretende Partikelgeschwindigkeit annimmt und daß der Druck vor dem Geschoß gleich Null ist (evakuiertes Rohr).

Die so berechnete Grenzgeschwindigkeit liegt je nach Art des verwendeten Pulvers bei $v_{e\,max} \approx 8000$ m/s.

Die innere Energie der Pulvergase zu dem Zeitpunkt, in dem das Geschoß die Mündung verläßt, ergibt sich aus dem Gesamtvolumen des Rohres und dem zu diesem Zeitpunkt bestehenden Gasdruck, dem Mündungsgasdruck. Bei einem vorgegebenen Rohr ist die restliche innere Energie der Pulvergase auf Kosten der Geschoßenergie um so höher, je höher der Mündungsgasdruck ist. Deshalb ist ein hoher Mündungsgasdruck immer ein Hinweis auf einen schlechten thermischen Wirkungsgrad.

2.1.4. Gasdruck und Rohrauslegung

Für die Konstruktion eines Waffenrohres, durch das ein Geschoß eine bestimmte Mündungsgeschwindigkeit erreichen soll, müssen der Gasdruckverlauf, insbesondere der maximale Gasdruck, und der Geschoßweg bekannt sein. Die genaue Ermittlung dieser Größen setzt Berechnungsverfahren voraus, wie sie in den nachfolgenden Abschnitten behandelt werden. Eine schnelle Übersicht über die für die geforderte Mündungswucht notwendige Auslegung des Rohres läßt sich aber aus der nachfolgenden Betrachtung gewinnen.



p_m = maximaler Gasdruck
$\bar{p}$ = mittlerer Gasdruck
p_e = Mündungsgasdruck
x_e = Geschoßweg

Bild 205. *Gasdruckverlauf über dem Geschoßweg.*

Die dem Gasdruckdiagramm (Bild 205) entsprechende Arbeit findet sich im wesentlichen in der kinetischen Energie des Geschosses und der Pulvergase wieder:

$$\int_0^{x_e} pA\,dx = \frac{m_p + \epsilon m_c}{2} v_e^2 \qquad (10)$$

mit A als Rohrquerschnittsfläche (Seelenquerschnitt). Das Arbeitsintegral wird durch

$$\int_0^{x_e} pA\,dx = \bar{p} A x_e \qquad (11)$$

ersetzt. Darin bedeutet $\bar{p}$ den mittleren Gasdruck, der durch

$$\bar{p} = \frac{\int_0^{x_e} p\,dx}{x_e} \qquad (12)$$

definiert ist.
Zwischen $\bar{p}$ und p_m wird die Beziehung

$$\eta_p = \frac{\bar{p}}{p_m} \qquad (13)$$

eingeführt, wobei η_p als Druckverhältnis bezeichnet wird.

Wenn man den Mitführungsfaktor $\epsilon = 0{,}5$ setzt, dann ergibt sich für die erforderliche Länge des Geschoßweges x_e:

$$x_e = \frac{m_p + 0{,}5\, m_c}{2\, A\, \eta_p\, p_m}\, v_e^2. \qquad (14)$$

In Gleichung (14) ist der Betrag von η_p und m_c offen. Die erforderliche Treibladungsmasse m_c ist näherungsweise zu bestimmen, indem aus Bild 204 der bei vorgegebener Mündungsgeschwindigkeit v_e zu fordernde Wert m_c/m_p abgelesen wird. Für η_p gelten im allgemeinen Werte zwischen 0,4 und 0,6. Es darf jedoch nicht übersehen werden, daß zwischen der erforderlichen Treibladungsmasse und dem Druckverhältnis ein Zusammenhang besteht. Die Ladungsausnutzung ist bei ähnlichen Gasdruckverläufen um so besser, je niedriger der Wert von η_p ist.

Man erkennt so die Grenzen dieser einfachen Betrachtungsweise. Wenn man die Beziehungen zwischen m_p/m_c, η_p und v_e aus vorhandenen Geräten ermittelt und damit nach Gleichung (14) neue Projekte berechnet, führt das zu einer erheblichen Einschränkung der Variationsmöglichkeiten, welche die Innenballistik bietet. Oft will man jedoch zunächst rasch Anhaltswerte ermitteln, und dafür leistet Gleichung (14) gute Dienste.

Die Gesamtlänge des Rohres erhält man, wenn man zum Geschoßweg noch die Länge des Ladungsraums hinzurechnet.

In der Tabelle 201 sind für Waffen verschiedener Kaliber D die Werte der in Gleichung (14) vorkommenden Größen sowie für ζ_e zusammengestellt.

Tabelle 201. *Innenballistische Werte für Rohrwaffen verschiedener Kaliber.*

D	x_e	m_p	m_c	p_m	v_e	η_p	ζ_e
mm	m	kg	kg	bar	m/s	1	1
20	1,728	0,120	0,052	3900	1055	0,38	0,44
30	2,315	0,360	0,160	3900	1080	0,40	0,46
90	3,062	5,74	3,92	4300	1145	0,60	0,30
105	4,791	5,83	5,54	4000	1478	0,57	0,45
155	3,004	43,09	9,23[1]	3200	684	0,62	0,35

[1] 8. Ladung

2.1.5. Innenballistische Berechnungsverfahren

Im folgenden wird ein Berechnungsverfahren für den Ablauf der Schußentwicklung umrissen; die zur Durchführung von Rechnungen erforderlichen Formeln werden angegeben. Das Verfahren berücksichtigt den Pulverabbrand; es enthält, um eine geschlossene Lösung zu erreichen, gewisse Vereinfachungen, die sich in der Praxis als zulässig erwiesen haben [2].

Ziel solcher theoretischer Untersuchungen ist es, die Zusammenhänge zwischen sämtlichen Parametern eines innenballistischen Systems darzustellen, um vor allem bei der Neuentwicklung von Rohrwaffen eine optimale Gestaltung zu erreichen.

Eine Zusammenstellung der verwendeten Symbole und ihrer Bedeutung findet sich in der Tabelle 202 und im Abschnitt 15.4, Begriffe und Symbole der inneren Ballistik.

2.1.5.1. Die Résalsche Gleichung

Die theoretische Behandlung der Innenballistik von Rohrwaffen geht von der Energiebilanz beim Schuß aus, wie sie zuerst von H. RÉSAL [3] aufgestellt wurde:

$$m_c \, Q_{ex} \, z = c_v \, T \, m_c z + \frac{m^*}{2} \dot{x}^2 . \qquad (15)$$

Diese Gleichung besagt, daß zu jedem Zeitpunkt der Schußentwicklung, bis zu dem der Ladungsanteil z umgesetzt wurde, die freigesetzte chemische Energie gleich der inneren Energie der bis dahin entstandenen Pulvergase und der kinetischen Energie einer effektiven Masse ist. Für die Pulvergase gilt die Zustandsgleichung

$$m_c R T z = pV \qquad (16)$$

mit V als freiem Gasvolumen.

Unter Berücksichtigung von Gleichung (16) sowie

$$R/c_v = \kappa - 1 \qquad (17)$$

wird aus Gleichung (15)

$$m_c \, Q_{ex} \, z = \frac{pV}{\kappa - 1} + \frac{m^*}{2} \dot{x}^2 . \qquad (18)$$

Tabelle 202. *In der inneren Ballistik verwendete Symbole.*[1]

Symbol	Dimension	Bedeutung
A	m^2	Rohrquerschnittsfläche
a	m/s	Schallgeschwindigkeit
B_a	$1/s$	Abbrandkoeffizient
c_V	$m^2/s^2 \cdot K$	spezifische Wärme bei konstantem Volumen
D	m	Rohrkaliber
e	m	einseitig abgebrannte Pulverschicht
f	m^2/s^2	Pulverkonstante (f-Wert)
M	kg/mol	Molmasse
m	kg	Masse (allgemein)
m_C	kg	Pulvermasse
m_P	kg	Geschoßmasse
p	kg/ms^2	Gasdruck am Rohrboden
p_{Cu}	kg/ms^2	Druck, gemessen mit Kupferstauchkörper
p_O	kg/ms^2	Normaldruck
Q_{ex}	kJ/kg	spezifische Explosionswärme
$R = R_O/M$	$m^2/s^2 \cdot K$	spezielle Gaskonstante
R_O	$m^2 kg/s^2 \cdot mol \cdot K$	universelle Gaskonstante
$r = de/dt$	m/s	lineare Verbrennungsgeschwindigkeit
S	m^2	Oberfläche des festen Pulvers
T	K	Gastemperatur
T_{ex}	K	Explosionstemperatur
t	s	Zeit
u	m/s	Geschwindigkeit der Treibladungsgase
V_B	m^3	Volumen des geometrischen Verbrennungsraums
v	m/s	Geschwindigkeit des Geschosses
x	m	Ordinate (allgemein)
z	1	Anteil der verbrannten Treibladungsmasse
α	1	Konstante des linearen Verbrennungsgesetzes
β	m/s	Konstante des linearen Verbrennungsgesetzes
$\Delta = m_C/V_B$	kg/m^3	Ladedichte
ϵ	1	Mitführungsfaktor
η	m^3/kg	Kovolumen der Treibladungsgase
κ	1	Verhältnis der spezifischen Wärmen
μ	1	Ladungsverhältnis
ρ	kg/m^3	Dichte
$\varphi (z)$	1	Formfunktion

[1] Symbole nach Richtlinien des Bundesministers der Verteidigung.

Indizes (Fortsetzung von Tabelle 202)

c	Treibladung (charge)
p	Geschoß (projectile)
r	Rohr
a	Werte bei Beginn der Verbrennung
m	Werte bei Erreichen des Maximalgasdrucks
b	Werte am Ende der Verbrennung
e	Werte zum Zeitpunkt des Geschoßdurchgangs durch die Mündung

Das freie Gasvolumen V hat zum betrachteten Zeitpunkt der Schußentwicklung die Größe

$$V = V_B - \frac{1}{\rho_c} m_c (1 - z) - \eta\, m_c z + Ax, \tag{19}$$

woraus sich nach Umstellung

$$V = V_B - \frac{1}{\rho_c} m_c - (\eta - \frac{1}{\rho_c})\, m_c z + Ax \tag{19a}$$

ergibt.

Aus mathematischen Gründen – und durch die Praxis im allgemeinen gerechtfertigt – wird

$$(\eta - \frac{1}{\rho_c})\, m_c z \ll V_B - \frac{1}{\rho_c} m_c + Ax \tag{20}$$

angenommen, so daß sich

$$V \approx V_B - \frac{1}{\rho_c} m_c + Ax = V_B^* + Ax \tag{21}$$

mit

$$V_B^* = V_B - \frac{1}{\rho_c} m_c \tag{22}$$

ergibt.

Die Résalsche Gleichung lautet dann

$$m_c Q_{ex} z = \frac{p}{\kappa - 1} (V_B^* + Ax) + \frac{m^*}{2} \dot{x}^2. \tag{23}$$

Genaugenommen, gilt Gleichung (23) für einen zeitabhängigen, über die Rohrlänge gemittelten Gasdruck $\overline{p}(t)$, da der Druck zwischen Rohrboden und Geschoßboden und damit auch die innere Energie der Gase unterschiedlich ist, was in Abschnitt 2.1.5.2 näher ausgeführt wird:

$$m_C Q_{ex} z = \frac{\overline{p}}{\kappa - 1} (V_B^* + Ax) + \frac{m^*}{2} \dot{x}^2. \qquad (23a)$$

2.1.5.2. Die Druckverteilung im Rohr

Bei der Schußentwicklung werden neben dem Geschoß und der Waffe (Rückstoß) auch die Treibladungsmasse bzw. die daraus entstandenen Pulvergase beschleunigt. Als Folge der Beschleunigung der Pulvergase ergibt sich ein Druckunterschied zwischen Rohrboden (Stoßboden) und Geschoßboden, weil ein Teil ihrer inneren Energie in Strömungsenergie überführt wird.

Die ersten theoretischen Untersuchungen zu diesem Problem gehen auf LAGRANGE (1783) zurück. Seither haben sich eine Reihe insbesondere englischer und französischer Ballistiker damit befaßt und für stark vereinfachte Modelle Lösungen angegeben. Eine zusammenfassende mathematische Behandlung für einen konstanten Geschwindigkeitsgradienten der Pulvergase vom Stoßboden bis zum Geschoß findet sich bei K. OSWATITSCH [4]. Diese Lösung gilt jedoch nur für geringere Geschoßgeschwindigkeiten, da bei höheren Geschwindigkeiten im Vergleich zur Schallgeschwindigkeit der Pulvergase der Geschwindigkeitsgradient in den Pulvergasen zum Geschoß hin zunimmt.

Die Frage nach dem Druckunterschied längs des Rohres zu einem bestimmten Zeitpunkt der Schußentwicklung hängt eng mit der Frage nach dem Anteil der mitbeschleunigten Ladung zusammen, wie man aus folgender Betrachtung erkennt (s. hierzu auch R. E. KUTTERER [5]. Nach dem Impulssatz, angewandt auf die Waffe beim Schuß als geschlossenes System, gilt:

$$(m_r + \epsilon_1 m_c) \dot{x}_r = (m_p + \epsilon m_c) \dot{x}, \qquad (24)$$

$$(m_r + \epsilon_1 m_c) \ddot{x}_r = (m_p + \epsilon m_c) \ddot{x}. \qquad (24a)$$

Darin stehen die Indizes r für Rohr, c für Treibladung und p für Geschoß. ϵ_1 ist der mit dem Rohr, ϵ der mit dem Geschoß beschleunigte Anteil der Ladung.

Unter Vernachlässigung von Reibungskräften gilt ferner:

$$m_r \ddot{x}_r = A p_r, \tag{25}$$

$$m_p \ddot{x} = A p_p. \tag{25a}$$

Durch Kombination von Gleichung (24a), (25) und (25a) mit

$$(m_r + \epsilon_1 m_c) \approx m_r \tag{26}$$

erhält man:

$$\Delta p = p_r - p_p = \epsilon \frac{m_c}{m_p} p_p, \tag{27}$$

$$\Delta p = \frac{1}{\frac{m_p}{\epsilon m_c} + 1} p_r. \tag{27a}$$

Mit Gleichung (27) oder (27a) ist der Zusammenhang zwischen dem Druckunterschied im Rohr Δp und dem Anteil der mit dem Geschoß beschleunigten Treibladung ϵ gegeben. Durch Messung des Druckes am Rohr- und am Geschoßboden während der Schußentwicklung läßt sich so der Betrag von ϵ experimentell ermitteln. Über solche Messungen wird von KUTTERER [5] berichtet. Danach ergeben sich Werte für ϵ um 0,5, die sich auch bei Projektrechnungen bewährt haben. Aus den einfachen gasdynamischen Modellen ergibt sich $\epsilon = 0{,}5$ für den Impuls und $\epsilon = 0{,}33$ für die Energie, wobei keine Energieverluste durch Wärmeübertragung berücksichtigt sind.

In der Folge wird immer der Gasdruck am Rohrboden betrachtet und der Druckunterschied im Rohr durch einen Anteil der Ladung in der effektiv zu beschleunigenden Masse berücksichtigt.

2.1.5.3. Der Pulverabbrand

Auf die Einzelheiten der Umsetzung von Treibladungspulvern, in der Ballistik kurz Pulverabbrand genannt, wird in Kap. 1, Explosivstoffe, eingegangen. Hier sei noch einmal folgendes erwähnt:

> Die Umsetzung des Pulvers erfolgt am einzelnen Korn von dessen freier Oberfläche her mit einer Umsetzungsrate der oberflächennahen Schicht, der linearen Verbrennungsgeschwindigkeit, die im wesentlichen von der chemischen Zusammensetzung des Pulvers und dem Druck in der Gasphase abhängt.

Der Anteil der Treibladung, der in der Zeiteinheit umgesetzt wird, hängt von der linearen Verbrennungsgeschwindigkeit und der Geometrie des Pulvers ab.

Für die lineare Verbrennungsgeschwindigkeit werden in der Literatur verschiedene Druckabhängigkeiten angegeben, die teilweise auf empirische Untersuchungen zurückgehen, teilweise aber auf qualitativen oder quantitativen theoretischen Ansätzen beruhen. Die für Geschützpulver wichtigen sind

nach VIEILLE: $$\frac{de}{dt} = \beta \left(\frac{p}{p_o}\right)^{\alpha}, \tag{28}$$

nach MURAOUR-AUNIS: $$\frac{de}{dt} = a + b \frac{p}{p_o} \tag{29}$$

und als Sonderfall von Gleichung (28) mit $\alpha = 1$ nach KRUPP-SCHMITZ:

$$\frac{de}{dt} = \beta \frac{p}{p_o} \tag{30}$$

Darin bedeuten de/dt die lineare Verbrennungsgeschwindigkeit, α, β, a und b Konstanten, die von der Temperatur der Pulvergase abhängen, und p_o der konstante Normaldruck.

Die lineare Verbrennungsgeschwindigkeit hängt in gewissem Maße auch von der Ausgangstemperatur des Pulvers ab (s. Kap. 1, Explosivstoffe). Daraus erklärt sich der Einfluß der Pulvertemperatur auf die Mündungsgeschwindigkeit und den Gasdruck (v_o-Korrektur in Schußtafeln).

Aus mathematischen Gründen wird in der Geschützballistik vorzugsweise Gleichung (30) angewendet; die Berechtigung dazu ergibt sich aus umfangreichen Meßreihen von SCHMITZ sowie anderen praktischen Erfahrungen. J. CORNER [6] gibt für Gleichung (30) einen Gültigkeitsbereich von 800 bis 4000 bar an.

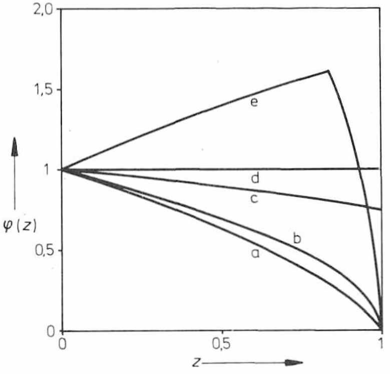
Der Zusammenhang zwischen dem Anteil der Treibladung dz/dt, der in der Zeiteinheit umgesetzt wird, und der Geometrie des Pulvers läßt sich durch die Gleichung

$$\frac{dz}{dt} = \frac{A}{A_a} \frac{\rho_c A_a}{m_c} \frac{de}{dt} \tag{31}$$

beschreiben. Darin bedeutet A_a die anfängliche Oberfläche der Pulverladung und A die Oberfläche zum betrachteten Zeitpunkt. Der Quotient A/A_a wird auch als Formfunktion $\varphi(z)$ bezeichnet, da jedem Wert von z im möglichen Wertebereich zwischen 0 und 1 eine Oberfläche A zugeordnet werden kann.

Treibladungspulver werden nun in den verschiedensten geometrischen Formen hergestellt, die sich teilweise aus bequemen Herstellungsverfahren oder guter Laborierbarkeit, teilweise jedoch im Hinblick auf ein gewünschtes Abbrandverhalten ergeben. So finden würfel- oder kugelförmige Pulverkörner als Schüttpulver, Vollzylinder-, Streifen- und Röhrenpulver mit einer zentralen oder mehreren Bohrungen (7-Lochpulver o. ä.) Verwendung.

Der Verlauf der Funktion $\varphi(z)$ ist für verschiedene Pulvergeometrien in Bild 206 dargestellt.



a = Würfel- oder Kugelpulver
b = Vollzylinderpulver
c = Streifenpulver (δ = 1/10)[1]
d = Röhrenpulver
e = 7-Loch-Pulver (D_C = 10 d_C)[2]

[1]) δ = Dicke/Breite des Streifens $\leqslant 1/4$

[2]) D_C = Außendurchmesser der Pulverstange, d_C = Durchmesser der Löcher

Bild 206. *Formfunktion $\varphi(z)$ für verschiedene Pulvergeometrien.*

Aus dieser Abbildung ist zu erkennen, daß das Röhrenpulver mit konstanter Formfunktion abbrennt; die Abnahme der äußeren Oberfläche der Röhre wird durch die Zunahme der Oberfläche der Bohrung kompensiert. Dabei ist vorausgesetzt, daß die Pulverröhre lang ist im Vergleich zum Durchmesser. Das Streifenpulver verhält sich genauso, wenn Breite und Länge der Folie groß gegenüber ihrer Dicke sind. Würfel- und Kugelpulver sowie Pulver in Form von Vollzylindern zeigen einen stark degressiven Verlauf der Formfunktion (Pulver mit degressivem Abbrand), während beim 7-Loch-Pulver die Oberfläche zunächst zunimmt bis zu dem Punkt, wo die einzelnen Stege des Pulverkorns abgebrannt sind; dann nimmt auch die Oberfläche des 7-Loch-Pulvers ab (Pulver mit vornehmlich progressivem Abbrand).

Pulver mit progressivem Abbrand werden verwandt, wenn eine große Mündungsgeschwindigkeit des Geschosses bei einem möglichst geringen Gasdruck erreicht werden soll.

Die Progressivität läßt sich auch bei Einloch-Röhrenpulvern erreichen, indem man das Pulverkorn mit geeigneten inerten Chemikalien oberflächenbehandelt. Dadurch werden der Heizwert und damit die Schwadentemperatur der oberflächennahen Schichten herabgesetzt. Das führt zu einer Minderung der linearen Verbrennungsgeschwindigkeit, so daß ohne Änderung der Geometrie der Anteil der umgesetzten Ladung anfänglich geringer ist. Bei dieser Phlegmatisierung des Pulvers an der Oberfläche ist auf eine gute physikalische Stabilität zu achten, d.h. die aufgebrachte Substanz muß ihr Konzentrationsprofil über Jahre hinaus erhalten; sie darf weder verdampfen noch weiter in das Pulverkorn eindiffundieren.

Mit Gleichung (30) wird aus Gleichung (31)

$$\frac{dz}{dt} = \frac{A}{A_a} \frac{\rho_c A_a \beta}{m_c} \frac{p}{p_o} \tag{32}$$

oder

$$\frac{dz}{dt} = B_a \varphi(z) \frac{p}{p_o}, \tag{33}$$

wenn man die Größe

$$B_a = \frac{A}{A_a} \frac{\rho_c A_a \beta}{m_c} \tag{34}$$

einführt.

B_a wird als Abbrandkoeffizient des Pulvers bezeichnet.

2.1.5.4. Verlauf von Druck und Geschoßgeschwindigkeit im Rohr

Um die innenballistische Energiegleichung (18) in eine Differentialgleichung mit einer Veränderlichen zu überführen, werden das Abbrandgesetz für das Treibladungspulver nach Gleichung (33) und die Bewegungsgleichung des Geschosses

$$m^* \ddot{x} = Ap \tag{35}$$

hinzugenommen.

Mit Gleichung (35) wird aus Gleichung (33)

$$\frac{dz}{dt} = \frac{B_a m^*}{p_o A} \varphi(z) \ddot{x}. \tag{36}$$

Es läßt sich zeigen, daß folgende Typen für die Formfunktion $\varphi(z)$ zu einer geschlossenen Integration der Energiegleichung führen:

$$\varphi(z) = 1, \tag{37}$$

$$\varphi(z) = (1 + az)^{\frac{1}{2}}. \tag{38}$$

Gleichung (37) bedeutet, daß die Gesamtoberfläche des Pulvers während des Abbrandes konstant bleibt. Mit Gleichung (38) läßt sich, je nachdem, ob die Konstante a ein positives oder negatives Vorzeichen hat, ein progressiver oder degressiver Pulverabbrand darstellen.

Im folgenden wird die mathematische Behandlung für den Fall konstanten Abbrands (Gleichung (37)) dargestellt [2], weil sich dafür einfachere Gleichungen ergeben als für den allgemeinen Fall nach Gleichung (38) [7]. Damit ergibt sich aus Gleichung (36) mit der Anfangsgeschwindigkeit $\dot{x} = 0$ für $z = 0$

$$z = \frac{B_a m^*}{p_o A} \dot{x}, \tag{39}$$

so daß aus Gleichung (18) mit den Gleichungen (21), (35) und (39) wird:

während des Pulverabbrandes

$$\frac{B_a m_c Q_{ex}}{p_o A} \dot{x} = \frac{(V_B^* + Ax)\ddot{x}}{A(\kappa - 1)} + \frac{\dot{x}^2}{2}, \tag{40}$$

nachdem das Pulver vollständig verbrannt ist

$$\frac{m_c Q_{ex}}{m^*} = \frac{(V_B^* + Ax)\ddot{x}}{A(\kappa - 1)} + \frac{\dot{x}^2}{2}, \tag{41}$$

da für diesen Fall

$$z = 1 \tag{39a}$$

gilt.

Wenn man für $\ddot{x}$

$$\ddot{x} = \frac{d\dot{x}}{dt} = \frac{d\dot{x}}{dx}\frac{dx}{dt} = \frac{d\dot{x}}{dx}\dot{x} \tag{42}$$

einführt, dann stellen die Gleichungen (40) und (41) zwei Differentialgleichungen für die Beziehung zwischen Geschoßweg und Geschoßgeschwindigkeit dar.

Mit den dimensionslosen Variablen

$$\xi = \frac{A}{V_B^*} x \tag{43}$$

für den Geschoßweg und

$$\vartheta = \frac{p_0 A}{2 B_a m_c Q_{ex}} \dot{x} \tag{44}$$

für die Geschoßgeschwindigkeit ergibt sich aus Gleichung (40) folgender Zusammenhang bis zum vollständigen Abbrand des Pulvers:

$$\vartheta = 1 - \frac{1}{(1 + \xi)^{\frac{\kappa - 1}{2}}}. \tag{45}$$

Nach dem Abbrand des Pulvers erhält man durch Integration von Gleichung (41) die Beziehung

$$\zeta = 1 - \frac{1}{(1 - \vartheta_b)(1 + \xi)^{\kappa - 1}}, \tag{46}$$

worin

$$\zeta = \frac{m^*}{2 m_c Q_{ex}} \dot{x}^2 \tag{47}$$

die dimensionslose Variable für die kinetische Energie bedeutet und ϑ_b die dimensionslose Geschwindigkeitsvariable bei Brennschluß des Pulvers ist.

Es ist also möglich, unter den getroffenen Voraussetzungen die Geschwindigkeit des Geschosses an jedem Ort des Rohres aus einer allgemein gültigen Beziehung zwischen zwei dimensionslosen Größen zu berechnen. Bis zum Verbrennungsende des Pulvers ist der Adiabatenexponent der Pulvergase der einzige Parameter der dimensionslosen Beziehung zwischen Weg und Geschwindigkeit des Geschosses; nach dem vollständigen Abbrand des Pulvers tritt in der entsprechenden Gleichung (46) als zweiter Parameter die dimensionslose Geschwindigkeitsvariable ϑ_b für den Brennschluß auf, die für jedes innenballistische System neu zu berechnen ist.

Da der Brennschluß des Pulvers durch $z = 1$ charakterisiert ist, kann die Geschwindigkeit des Geschosses bei Brennschluß $\dot{x}_b$ aus Gleichung (39) zu

$$\dot{x}_b = \frac{p_o A}{B_a m^*} \tag{48}$$

berechnet werden.

Mit Gleichung (48) erhält man aus Gleichung (44)

$$\vartheta_b = \frac{p_o^2 A^2}{2 B_a^2 m^* m_c Q_{ex}} \; . \tag{49}$$

Durch Auswertung von Gleichung (49) ergibt sich

a) die Grenze, bis zu welcher die Schußentwicklung durch Gleichung (45) beschrieben wird. Für

$$\vartheta \leqslant \frac{p_o^2 A^2}{2 B_a^2 m^* m_c Q_{ex}}$$

gilt Gleichung (45), für

$$\vartheta \leqslant \frac{p_o^2 A^2}{2 B_a^2 m^* m_c Q_{ex}}$$

gilt Gleichung (46);

b) die Konstante ϑ_b in Gleichung (46).

Somit kann die Geschoßgeschwindigkeit an jedem Ort des Rohres berechnet werden. Dabei geht man praktischerweise von Zahlentafeln oder Diagrammen für die Funktionen

$$\vartheta = 1 - \frac{1}{(1 + \xi)^{\frac{\kappa - 1}{2}}} \tag{45}$$

und

$$\psi = \frac{1}{(1 + \xi)^{\kappa - 1}} \tag{50}$$

aus, wobei κ als Parameter auftritt. Für verschiedene κ-Werte sind diese Funktionen in den Bildern 207 und 208 dargestellt.

Wenn es darum geht, bei vorgegebenen innenballistischen Größen den Druck- und Geschwindigkeitsverlauf zu berechnen, wird zunächst der

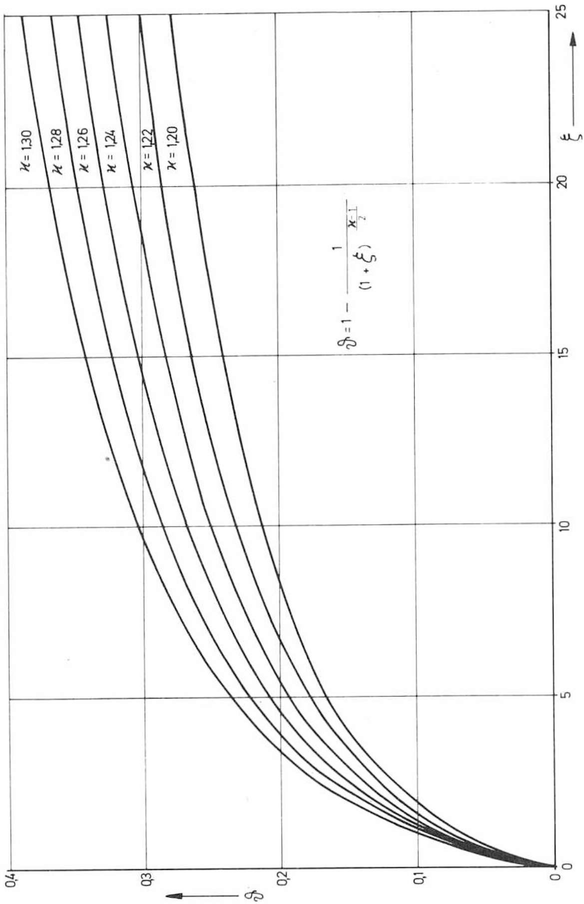


Bild 207. *Verlauf der dimensionslosen Geschwindigkeit* ϑ *über dem dimensionslosen Geschoßweg* ξ *bis zum Brennschluß für verschiedene* κ*-Werte.*

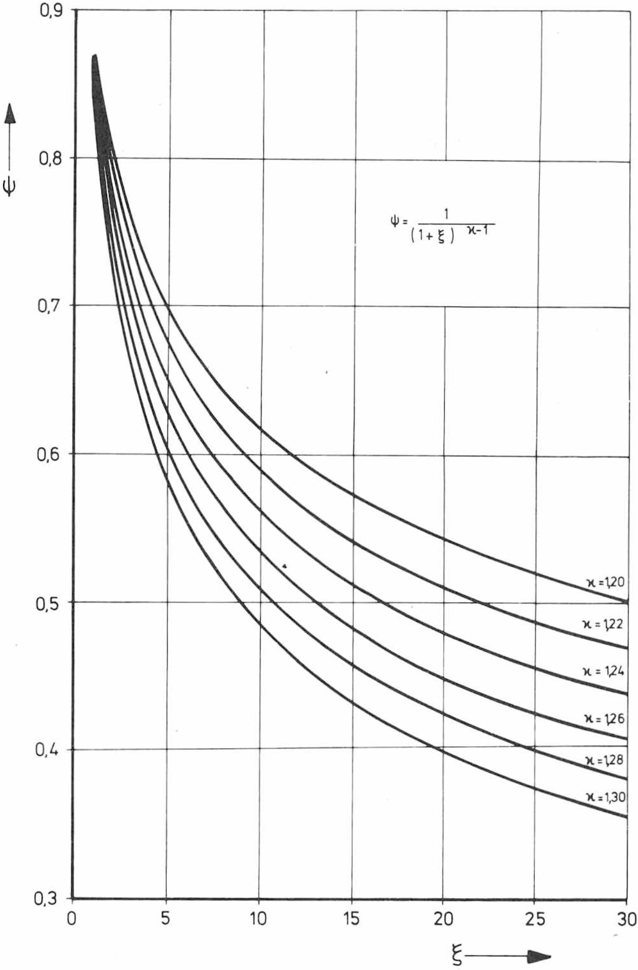


Bild 208. *Verlauf der dimensionslosen Größe ψ über dem dimensionslosen Geschoßweg ξ für verschiedene κ-Werte.*

Geschoßweg nach Gleichung (43) in die dimensionslose Ortsvariable bis zu ξ_e für die Mündung umgerechnet. Bis zum Brennschluß, den man nach Gleichung (49) ermittelt, wird in geeigneten Schrittweiten $\Delta\xi$ aus Bild 207 mit dem durch die Pulverdaten festgelegten κ-Wert das jeweilige ϑ abgelesen und nach Gleichung (44) in die Geschoßgeschwindigkeit umgerechnet. Aus der Geschwindigkeit kann nach Gleichung (39) der Anteil der umgesetzten Ladung berechnet werden.

Da in der angegebenen Weise x, $\dot{x}$ und z zu berechnen sind, kann aus der Résalschen Gleichung in der Form von Gleichung (23) der jeweilige Druck direkt berechnet werden.

Nach dem Brennschluß verfährt man entsprechend. Zunächst ist der Wert von

$$C = \frac{1}{1 - \vartheta_b} \tag{51}$$

mit Gleichung (49) zu ermitteln.

Über die abzulesenden Werte für ψ (Bild 208) können für $\xi_b \leqslant \xi \leqslant \xi_e$ die nach Gleichung (46) zugeordneten Werte von ζ ermittelt werden, die dann mit Gleichung (47) zur Geschoßgeschwindigkeit $\dot{x}$ führen.

Der Gasdruck über dem Geschoßweg ergibt sich dann wieder aus Gleichung (23) mit z = 1.

Häufig erscheint es wünschenswert, eine Zuordnung zwischen Geschoßweg und Zeit zu haben, z.B. um die errechneten Gasdruckkurven mit den gemessenen p(t)-Kurven zu vergleichen. Diese Zuordnung wird durch das Integral

$$t = \int_{x_e}^{x} \frac{dx}{\dot{x}(x)} \tag{52}$$

erreicht, dessen Lösung numerisch erfolgt. Als Anfangspunkt der Integration wird die Rohrmündung gewählt, weil die Zuordnung von Weg und Zeit zu Beginn der Schußentwicklung wegen zusätzlicher Effekte problematisch ist. Im nachfolgenden Abschnitt 2.1.5.5 wird der Rechengang an einem Beispiel noch einmal ausführlich dargestellt.

Das hier benutzte innenballistische Modell führt auch zu einer übersichtlichen Formel für den maximalen Gasdruck:

$$p_m = \frac{2\,(\kappa - 1)\, m^* \,(B_a\, m_c\, Q_{ex})^2}{V_B^*\, p_o^2\, A^2} \left(\frac{\vartheta - \vartheta^2}{1 + \xi}\right)_{p = p_m} \tag{53}$$

Darin bedeuten ϑ und ξ die am Ort des maximalen Gasdruckes nach Gleichung (45) zugeordneten Größen. Der Ort des maximalen Gasdruckes folgt danach aus der einfachen Beziehung

$$\vartheta_{p_m} = \frac{\kappa - 1}{2\kappa} . \qquad (54)$$

Das Auftreten eines maximalen Gasdruckes nach Gleichung (53) setzt voraus, daß der Gasdruck ein echtes Maximum durchläuft, wie in Bild 202a angegeben. Die Bedingung dafür ist

$$\vartheta_{p_m} \leqslant \vartheta_b . \qquad (55)$$

Wenn die Ungleichung (55) nicht erfüllt ist, gibt es kein echtes Druckmaximum, und der höchste Gasdruck tritt bei Brennschluß auf (s. Bild 202b).

Aus Gleichung (53) folgt eine für die praktische Innenballistik sehr nützliche Differenzenformel: Wenn gefragt ist, wie bei einer gegebenen Waffe das Ladungsgewicht geändert werden muß, um bei einer Änderung des Geschoßgewichtes Δm_p den vorher festgestellten Gasdruck beizubehalten, so ist eine Abschätzung nach

$$\Delta m_c = - \frac{m_c}{2 m_p + 3 \epsilon m_c} \Delta m_p \qquad (56)$$

möglich.

2.1.5.5. Berechnungsbeispiel

Die Berechnung der Geschoßgeschwindigkeit und des Gasdruckes über dem Geschoßweg und über der Zeit ist am Beispiel der Maschinenkanone MK 20 Rh 202 auf einem Rechenformular ausgeführt.

Dieses Formular enthält auf dem ersten Blatt (S. 98) unter A zunächst eine Zusammenstellung der innenballistischen Daten. Die Pulverdaten werden kalorischen und Druckbombenmessungen entnommen. Es folgt unter B eine Berechnung der allgemeinen Größen, die für die weitere Auswertung erforderlich sind. Unter C werden die interessierenden Größen bis Brennschluß des Pulvers berechnet.

Das zweite Blatt (S. 99) enthält unter D, E und F Beziehungen, die für Projektrechnungen (Abschnitt 2.1.5.6) benötigt werden; unter D wird gleichzeitig geprüft, ob ein echtes Druckmaximum vorliegt. Die Konstante C in Gleichung (51) wird wie beschrieben ermittelt und unter G eingetragen.

Das dritte Blatt (S. 100) ist für die Berechnung des Druck- und Geschwindigkeitsverlaufs bis zum Brennschluß in zwölf Spalten aufgeteilt. Spalte 1 enthält ξ, dessen Schrittweite sich aus der erforderlichen Genauigkeit ergibt. In Spalte 2 wird x nach Gleichung (43) eingetragen. Spalte 3 enthält das dem ξ zugeordnete ϑ nach Gleichung (45) bzw. aus dem Diagramm Bild 207. Aus Spalte 3 folgt in Spalte 4 die Geschoßgeschwindigkeit $\dot{x}$ nach Gleichung (44). Der Anteil der verbrannten Ladung z (Spalte 5) wird aus Gleichung (39) berechnet. In Spalte 7 wird mit Spalte 6 die effektive kinetische Energie berechnet, während in Spalte 8 die freigesetzte Pulverenergie bestimmt wird. Die Differenz der Spalten 8 und 7 (Spalte 9), dividiert durch $\kappa - 1$ und das über Spalte 10 berechnete Gasvolumen (Spalte 11), ergibt den Gasdruck (Spalte 12).

Auf dem vierten Blatt (S. 101) ist in ebenfalls zwölf Spalten die Berechnung des Druck- und Geschwindigkeitsverlaufs über dem Geschoßweg nach Brennschluß des Pulvers auszuführen, die mit den entsprechenden Formeln (ζ statt ϑ) analog zum dritten Blatt abläuft.

Auf dem fünften Blatt (S. 102) wird durch numerische Integration (Simpsonsche Formel) nach Gleichung (52) die dem Weg zugeordnete Zeit berechnet.

Das sechste und siebente Blatt (S. 103) werden für die graphische Darstellung von Druck- und Geschwindigkeitsverlauf über dem Geschoßweg bzw. der Zeit verwendet.

Das besprochene Rechenformular kann als brauchbares Hilfsmittel angesehen werden, wenn Rechnungen ohne größeren Aufwand durchgeführt werden sollen. Bei einer größeren Anzahl von Rechnungen wird man eine elektronische Rechenanlage einsetzen, mit deren Hilfe dann auch komplizierte innenballistische Modelle [7] leichter bearbeitet werden können.

2.1.5.6. Projektrechnungen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde für Treibladungspulver, die mit konstanter Oberfläche abbrennen, die Abhängigkeit des Gasdrucks und der Geschoßgeschwindigkeit von den innenballistischen Parametern aufgezeigt. Diese Zusammenhänge lassen sich für das entscheidende Ergebnis der Innenballistik, die Mündungsgeschwindigkeit, in einer Formel zusammenfassen, die in einer Version ausschließlich eigentliche Parameter enthält (Gleichung (57)); in einer anderen Version (Gleichung (58)) erscheint die Konstante B_a für die Verbrennungsgeschwindigkeit nicht explizit, dafür jedoch der maximale Gasdruck p_m:

$$v_e = \sqrt{\frac{2 m_c Q_{ex}}{m^*}\left[1 - \frac{1}{1 - \frac{p_o^2 A^2}{2 B_a^2 m^* m_c Q_{ex}}} \cdot \frac{1}{(1+\xi_e)^{\kappa - 1}}\right]} \tag{57}$$

$$v_e = \sqrt{\frac{2 m_c Q_{ex}}{m^*}\left[1 - \frac{1}{1 - \frac{m_c Q_{ex}(\kappa - 1)}{V_B^* p_m}\left(\frac{\vartheta - \vartheta^2}{1+\xi}\right)_{p_m}} \cdot \frac{1}{(1+\xi_e)^{\kappa - 1}}\right]} \tag{58}$$

In diesen Gleichungen sind die innenballistischen Parameter

m_p, m_c, A, V_B, x_e, Q_{ex}, κ und B_a bzw. p_m

enthalten.

Bei Projektrechnungen ist im allgemeinen zunächst das Geschoß mit seinem Gewicht und damit aus dem Kaliber der Seelenquerschnitt vorgegeben. Aus der Geschoßkonstruktion ergibt sich ferner wegen der Beanspruchungsgrenze der maximale Gasdruck.

Die Zusammensetzung des Pulvers wird man im Hinblick auf die Rohrlebensdauer auswählen, daher sind auch Q_{ex} und κ festgelegt.

So bleibt für die innenballistische Projektrechnung die Abstimmung von m_c, V_B und x_e, um die geforderte Mündungsgeschwindigkeit des Geschosses zu erreichen.

Der Geschoßweg x_e und damit die Rohrlänge sind aus waffentechnischen Gesichtspunkten oft nur in engen Grenzen variierbar. Die zu bestimmenden Größen reduzieren sich also schließlich im wesentlichen auf die Treibladungsmasse und den Verbrennungsrauminhalt. Dabei ist die Treibladungsmasse in entscheidender Weise bestimmend für die Mündungsgeschwindigkeit, während der Verbrennungsrauminhalt den thermischen Wirkungsgrad (Klammerausdrücke unter der Wurzel der Gleichungen (57) und (58)) beeinflußt.

In der Regel wird man den Verbrennungsraum möglichst klein wählen, um zu kleinen Patronenabmessungen zu kommen, was z.B. für automatische Kanonen wichtig ist. Die untere Grenze für den Verbrennungsrauminhalt ist natürlich die Ladefähigkeit des Pulvers; es werden Ladedichten bis zu 1050 kg/m³ erreicht.

Sind nach Gleichung (58) bei einer vorgegebenen Geschoßkonstruktion (m_p, A, p_m), einer geforderten Mündungsgeschwindigkeit v_e und einer bestimmten Pulverzusammensetzung (Q_{ex}, κ) der Geschoßweg x_e, die

Rechenformular für die innere Ballistik normaler Rohre — **Blatt 1**

Rohr: Mk 20 Rh 202 — Geschoß: Übungsgeschoß — Treibladungspulver: NC A3502

A. Innenballistische Daten

Spezifische Explosionswärme	Q_{ex} (kJ/kg)	$= 3{,}517 \cdot 10^3$
Abbrandkoeffizient	B_a (1/s)	$= 0{,}262$
Dichte des Pulvers	ρ_c (kg/m³)	$= 1{,}60 \cdot 10^3$
Verhältnis der spez. Wärmen der Pulvergase	$\kappa = c_p/c_v$	$= 1{,}30$[1]
Pulvermasse	m_c (kg)	$= 0{,}0505$
Geschoßmasse	m_p (kg)	$= 0{,}120$
Sébertscher Faktor	ϵ	$= 0{,}5$
Rohrkaliber	D (m)	$= 0{,}02$
Geschoßweg	x_e (m)	$= 1{,}7275$
Verbrennungsraum	V_B (m³)	$= 5{,}515 \cdot 10^{-5}$
maximaler Gasdruck	p_m (bar)	$= 3432$
Zahl der Züge	n_z	$= 15$
Breite der Züge	b_z (m)	$= 2{,}50 \cdot 10^{-3}$
Tiefe der Züge	t (m)	$= 4{,}25 \cdot 10^{-4}$

B. Berechnung der allgemeinen Größen

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 + n_z b_z t = 3{,}301 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m}^2$$

$$V_B^* = V_B - \frac{m_c}{\rho_c} = 2{,}359 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{m}^3$$

$$\xi_e = \frac{A}{V_B^*}\, x_e = 24{,}17$$

$$x = \frac{V_B^*}{A}\, \xi = 7{,}146 \cdot 10^{-2}\, \xi\ \mathrm{m}$$

$$m^* = m_p + \epsilon m_c = 0{,}1453\ \mathrm{kg}$$

C. Berechnung der Größen bis zum Brennschluß

$$\vartheta_b = \frac{p_o^2 A^2}{2 B_a^2 m^* m_c Q_{ex}} = 0{,}2958$$

$$\dot{x} = \frac{2 B_a m_c Q_{ex}}{p_o A}\, \vartheta = 2875\, \vartheta\ \mathrm{m/s}$$

$$z = \frac{B_a m^*}{p_o A}\, \dot{x} = 1{,}176 \cdot 10^{-3}\, \dot{x}$$

[1] Der Wert $\kappa = 1{,}30$ entspricht den Daten in der unter [7] aufgeführten Arbeit. Der Unterschied ergibt sich aus der hier gewählten vereinfachten Darstellung (keine Berücksichtigung des Ladungsverhältnisses μ bei der Berechnung des mittleren Gasdrucks im Rohr, d. h. μ beliebig klein).

Rechenformular für die innere Ballistik normaler Rohre — **Blatt 2**

D. Berechnung des maximalen Gasdruckes

$$\vartheta_{p_m} = \frac{\kappa - 1}{2\kappa} = 0{,}1154$$

Prüfen, ob $\vartheta_{p_m} < \vartheta_b$

für $\frac{\kappa - 1}{2\kappa} > \vartheta_b$ ist $\vartheta_{p_m} = \vartheta_b$

$$p_m = \frac{2(\kappa - 1)\, m^* \,(B_a\, m_c\, Q_{ex})^2}{V_B^* \qquad p_o^2\, A^2} \left(\frac{\vartheta - \vartheta^2}{1 + \xi}\right) \quad p = p_m$$

$= 3442$ bar

E. Berechnung der Mündungsgeschwindigkeit bei vorgegebenem maximalem Gasdruck

$$\xi_e = 1 - \frac{1}{1 - \dfrac{m_c\, Q_{ex}\,(\kappa - 1)}{V_B^*\, p_m} \left(\dfrac{\vartheta - \vartheta^2}{1 + \xi}\right)_{p_m}} \cdot \frac{1}{(1 + \xi_e)^{\kappa - 1}}$$

$= 0{,}4605$

$$v_e = \sqrt{\frac{2 m_c\, Q_{ex}\, \xi_e}{m^*}} = 1061 \text{ m/s}$$

F. Berechnung des Abbrandkoeffizienten bei vorgegebenem maximalem Gasdruck

$$B_a^2 = \frac{V_B^*\, p_o^2\, A^2\, p_m}{2(\kappa - 1)\, m^*\, m_c^2\, Q_{ex}^2} \left(\frac{1 + \xi}{\vartheta - \vartheta^2}\right)_{p_m}$$

$B_a = 0{,}2620$ 1/s

G. Berechnung der Konstanten C für die Geschwindigkeit nach Brennschluß

$$C = \frac{1}{1 - \vartheta_b} = 1{,}420$$

Rechenformular für die innere Ballistik normaler Rohre — **Blatt 3**

H. Bestimmung des Druck- und Geschwindigkeitsverlaufs bis Brennschluß

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
ξ	x	ϑ	$\dot{x}$	z	$\dot{x}^2$	$\frac{m^*}{2}\dot{x}^2$	$m_c Q_{ex} z$	(8)–(7)	$A \cdot x$	$\frac{V_B^* + Ax}{\kappa - 1}$	$p =$ (9) : (11)
1	m	1	m/s	1	m^2/s^2	J	J	J	$10^{-6} m^3$	$10^{-6} m^3$	bar
0,015	0,00107	0,002231	6,414	0,00754	41,14	2,99	1340	1337	0,354	79,81	167,5
0,05	0,00357	0,007292	20,96	0,02465	439,3	31,92	4378	4346	1,179	82,56	526,4
0,10	0,00715	0,01419	40,80	0,04798	1665	121,0	8522	8401	2,359	86,50	971,2
0,15	0,01072	0,02075	59,65	0,07016	3559	258,6	12461	12202	3,539	90,43	1349
0,20	0,01429	0,02698	77,57	0,09122	6017	437,1	16201	15764	4,717	94,36	1671
0,25	0,01787	0,03292	94,64	0,1113	8957	650,7	19768	19117	5,899	98,30	1945
0,30	0,02144	0,03859	110,9	0,1304	12299	893,5	23160	22267	7,077	102,2	2179
0,60	0,04288	0,06807	195,7	0,2301	38298	2782	40868	38086	14,15	125,8	3028
0,90	0,06431	0,09179	263,9	0,3103	69643	5060	55112	50052	21,23	149,4	3350
1,265	0,0904	0,1154	331,8	0,3902	110091	7998	69303	61305	29,84	178,1	3442
1,50	0,1072	0,1284	369,1	0,4341	136235	9897	77100	67203	35,39	196,6	3418
2,00	0,1429	0,1519	436,7	0,5136	190707	13855	91220	77365	47,17	235,9	3280
2,50	0,1787	0,1713	492,5	0,5792	242556	17622	102871	85249	58,99	275,3	3097
3,00	0,2144	0,1877	539,6	0,6346	291168	21153	112710	91557	70,77	314,5	2911
3,50	0,2501	0,2020	580,7	0,6829	337212	24498	121289	96791	82,56	353,8	2736
4,00	0,2858	0,2145	616,7	0,7252	380319	27630	128802	101172	94,34	393,1	2574
5,00	0,3573	0,2357	677,6	0,7968	459142	33357	141518	108161	117,9	471,6	2293
6,00	0,4288	0,2531	727,6	0,8556	529402	38461	151962	113501	141,5	550,3	2063
7,00	0,5002	0,2680	770,5	0,9061	593670	43130	160931	117801	165,1	629,0	1873
8,00	0,5717	0,2808	807,3	0,9494	651733	47348	168622	121274	188,7	707,6	1714
9,36	0,6689	0,2958	850,4	1,0000	723180	52539	177609	125070	220,8	814,6	1535

Rechenformular für die innere Ballistik normaler Rohre **Blatt 4**

I. Bestimmung des Druck- und Geschwindigkeitsverlaufs nach Brennschluß

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
ξ	x	$C \cdot \psi$	ζ	$\dot{x}^2$	$\dot{x}$	$\frac{m^*}{2}\dot{x}^2$	$m_c Q_{ex}$	(8)—(7)	$A \cdot x$	$\frac{V_B^* + Ax}{\kappa - 1}$	p=(9) : (11)
1	m	1	1	m^2/s^2	m/s	J	J	J	$10^{-6}\,m^3$	$10^{-6}\,m^3$	bar
9,36	0,6689	0,7042	0,2958	723147	850,4	52537	177609	125072	220,8	814,6	1535
10,0	0,7146	0,6916	0,3084	753950	868,3	54774	177609	122835	235,9	865,0	1420
11,0	0,7861	0,6738	0,3262	797466	893,0	57936	177609	119673	259,5	943,6	1268
12,0	0,8575	0,6578	0,3422	836581	914,6	60778	177609	116831	283,1	1022	1143
13,0	0,9290	0,6434	0,3566	871785	933,7	63335	177609	114274	306,7	1101	1038
14,0	1,000	0,6302	0,3698	904055	950,8	65680	177609	111929	330,1	1179	949,4
15,0	1,072	0,6181	0,3819	933636	966,2	67829	177609	109780	353,9	1258	872,7
16,0	1,143	0,6070	0,3930	960773	980,2	69800	177609	107809	377,3	1336	807,0
17,0	1,215	0,5966	0,4034	986198	993,1	71647	177609	105962	401,1	1416	748,3
18,0	1,286	0,5870	0,4130	1009667	1005	73352	177609	104257	424,5	1494	697,8
19,0	1,358	0,5781	0,4219	1031425	1016	74933	177609	102676	448,3	1573	652,7
20,0	1,429	0,5697	0,4303	1051961	1026	76425	177609	101184	471,7	1651	612,9
21,0	1,501	0,5618	0,4382	1071274	1035	77828	177609	99781	495,5	1730	576,8
23,0	1,644	0,5473	0,4527	1106722	1052	80403	177609	97206	542,7	1888	514,9
24,17	1,727	0,5395	0,4605	1125791	1061	81789	177609	95820	570,1	1979	484,2

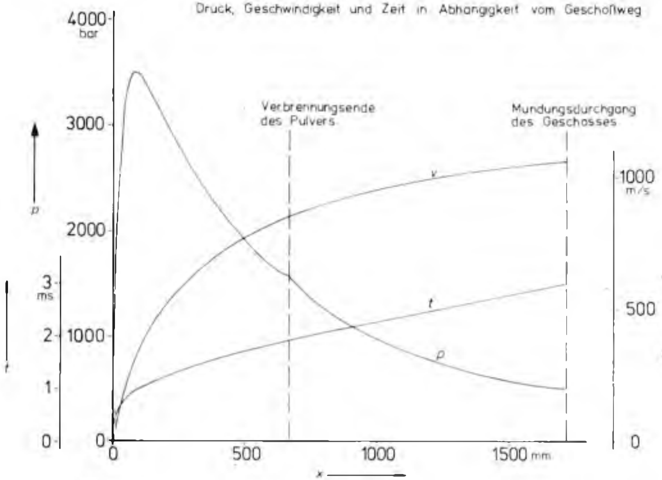
Rechenformular für die innere Ballistik normaler Rohre — Blatt 5

J. Ermittlung der zugeordneten Zeit durch numerische Integration

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
n	x_n	$\dot{x}_n$	$\frac{1}{\dot{x}_n}$	$\Delta_n^1 = \frac{1}{\dot{x}_{n+1}} - \frac{1}{\dot{x}_n}$	$\Delta_n^2 = \Delta_{n+1}^1 - \Delta_n^1$	$\frac{1}{6}\cdot(6)$	(4)+(7)	$x_{n-1} - x_{n+1}$	(8)·(9)	$t=\Sigma(10)$
1	m	m/s	10^{-3} s/m	10^{-3} s/m	10^{-3} s/m	10^{-3} s/m	10^{-3} s/m	m	10^{-3} s	10^{-3} s
1	1,727	1061	0,9425							
				0,0081						
2	1,644	1052	0,9506		0,0075	0,00125	0,9519	0,226	0,2151	2,902
				0,0156						
3	1,501	1035	0,9662							
				0,0085						
4	1,429	1026	0,9747		0,0011	0,000183	0,9749	0,143	0,1394	2,687
				0,0096						
5	1,358	1016	0,9843							
				0,0107						
6	1,286	1005	0,9950		0,0013	0,000217	0,9952	0,143	0,1423	2,548
				0,012						
7	1,215	993,1	1,007							
				0,013						
8	1,143	980,2	1,020		0,002	0,000333	1,020	0,143	0,1459	2,406
				0,015						
9	1,072	966,2	1,035							
				0,017						
10	1,000	950,8	1,052		0,002	0,000333	1,052	0,143	0,1504	2,260
				0,019						
11	0,9290	933,7	1,071							
				0,022						
12	0,8575	914,6	1,093		0,005	0,000833	1,094	0,1429	0,1563	2,110
				0,027						
13	0,7861	893,0	1,120							
				0,032						
14	0,7146	868,3	1,152		0,055	0,00917	1,161	0,2144	0,2489	1,954
				0,087						
15	0,5717	807,3	1,239							
				0,059						
16	0,5002	770,5	1,298		0,017	0,00283	1,301	0,1429	0,1859	1,705
				0,076						
17	0,4288	727,6	1,374							
				0,102						
18	0,3573	677,6	1,476		0,044	0,00733	1,483	0,1430	0,2121	1,519
				0,146						
19	0,2858	616,7	1,622							
				0,100						
20	0,2501	580,7	1,722		0,031	0,00517	1,727	0,0714	0,1233	1,307
				0,131						
21	0,2144	539,6	1,853							
				0,177						
22	0,1787	492,5	2,030		0,083	0,0138	2,044	0,0715	0,1461	1,184
				0,260						
23	0,1429	436,7	2,290							
				0,419						
24	0,1072	369,1	2,709		0,661	0,110	2,819	0,0786	0,2216	1,038
				1,080						
25	0,06431	263,9	3,789							
				1,321						
26	0,04288	195,7	5,110		2,586	0,431	5,541	0,0429	0,2377	0,8164
				3,907						
27	0,02144	110,9	9,017							
				1,553						
28	0,01787	94,64	10,57		0,767	0,128	10,70	0,00715	0,0765	0,5787
				2,32						
29	0,01429	77,57	12,89							
				3,87						
30	0,01072	59,66	16,76		3,88	0,647	17,41	0,00714	0,1243	0,5022
				7,75						
31	0,007146	40,80	24,51							
				23,2						
32	0,003573	20,96	47,71		85,0	14,17	61,88	0,00607	0,3759	0,3779
				108,2						
33	0,001072	6,41	155,9							

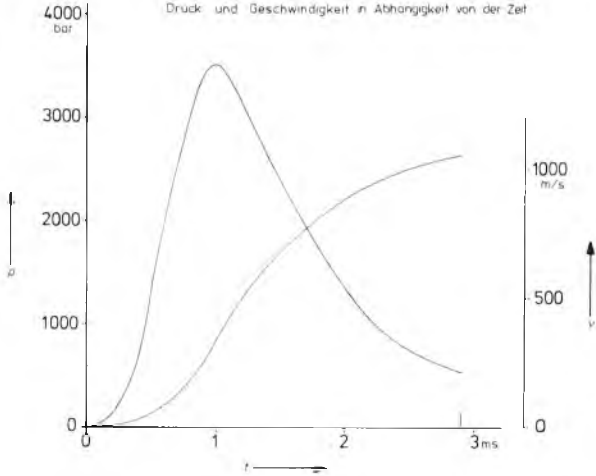
Rechenformular für die innere Ballistik normaler Rohre — Blatt 6

Druck, Geschwindigkeit und Zeit in Abhängigkeit vom Geschoßweg



Rechenformular für die innere Ballistik normaler Rohre — Blatt 7

Druck und Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit



Treibladungsmasse m_c und der Verbrennungsrauminhalt V_B festgelegt, dann kann aus Gleichung (53) die Abbrandgeschwindigkeit B_a des Pulvers berechnet werden. Bei Kenntnis der linearen Verbrennungsgeschwindigkeit des gewählten Pulvertyps wird dann nach Gleichung (34) die erforderliche Wandstärke des Pulvers aus

$$B_a = \frac{A}{A_a} \quad \frac{\rho_c A_a \beta}{m_c} \tag{34}$$

ermittelt. So gilt z. B. für Röhrenpulver

$$B_a = \frac{4\beta}{D_c - d_c}, \tag{59}$$

wobei D_c der Außen- und d_c der Innendurchmesser der einzelnen Pulverröhre ist.

Die innenballistische Projektrechnung läßt sich, da verschiedene Parameter gegeneinander variiert werden können, auch auf eine Optimierung hin ausdehnen. Optimierungsziele wären z.B. maximale Ladungsausnutzung, maximale Rohrausnutzung bei gegebenem Maximalgasdruck, geringes Rohrgewicht, geringer Mündungsgasdruck o. ä. Für Einzelheiten hierzu siehe CORNER [6].

2.1.6. Der Rohrrücklauf und die Mündungsbremse

Die bei der Schußentwicklung auf das Rohr wirkenden Kräfte werden bei Kanonen heute allgemein als nach rückwärts gerichtete Beschleunigung des Rohres aufgenommen. Die kinetische Energie des Rohres wird dann auf dem Rücklaufweg durch eine hydraulische Rohrbremse aufgezehrt. Um das Rohr nach dem Schuß wieder in seine Ausgangsposition zu bringen, wird beim Rücklauf ein Vorholer gespannt, der häufig aus einer Gasfeder besteht (vgl. Kap. 8, Geschütze).

Bei Gewehren o.ä. wird, wie früher auch bei Kanonen, die Rückstoßkraft direkt in die Unterstützung (Schulter des Schützen bzw. Sporn/Boden) abgeleitet.

Der dem freien Rohr bei der Schußentwicklung übertragene Impuls I_r setzt sich aus dem Impuls bis zum Geschoßaustritt I_p^* und der Nachwirkung der ausströmenden Pulvergase I_c zusammen:

$$I_r = I_p^* + I_c. \tag{60}$$

Für den übertragenen Impuls bis zum Geschoßaustritt I_p^* (gleich Impuls des Geschosses und des Anteils der mitbeschleunigten Ladung) gilt:

$$I_p^* = (m_p + 0{,}5\ m_c)\ v_o, \tag{61}$$

wobei v_o die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses ist, die sich aus der Mündungsgeschwindigkeit v_e und der Rücklaufgeschwindigkeit des Rohres v_r zu

$$v_o = v_e - v_r \tag{62}$$

ergibt.

Der durch die Nachwirkung der Pulvergase übertragene Impuls, dessen Größe durchaus beträchtlich ist, berechnet sich nach

$$I_c = 0{,}5\ m_c\ (\bar{u} - v_o) + 0{,}5\ m_c \bar{u}. \tag{63}$$

Darin ist $\bar{u}$ die mittlere Ausströmgeschwindigkeit der Treibladungsgase aus der Rohrmündung:

$$\bar{u} = \sqrt{v_o^2 + \bar{a}^2} \tag{64}$$

mit $\bar{a}$ als mittlerer Schallgeschwindigkeit am Rohrmündungsquerschnitt. Für Abschätzungen kann $\bar{a}$ = 1000 m/s angenommen werden.

Die Rücklaufenergie E_r, die sich formal aus

$$E_r = \frac{I_r^2}{2 m_r} \tag{65}$$

mit m_r als Rohrmasse ergibt, wird üblicherweise aus

$$E_r = \frac{(m_p + \beta m_c)^2}{2 m_r}\ v_o^2 \tag{66}$$

berechnet, worin

$$\beta = \frac{\bar{u}}{v_o} \tag{67}$$

ein die Nachwirkung charakterisierender Faktor ist.

Die geringste Beanspruchung der Rohrbremse und damit der Lafette bei vorgegebenem Rücklauf liegt dann vor, wenn die Bremskraft während des gesamten Rohrrücklaufs konstant ist. Durch geeignete Konstruktion der Rohrbremse läßt sich eine nahezu konstante Bremskraft in der Praxis durchaus erreichen. Einzelheiten hierzu finden sich im Abschnitt 9.6, Belastung der Lafette beim Schuß.

Um Rohrrücklauf und Bremskraft gering zu halten, werden Mündungsbremsen eingesetzt; das sind an der Rohrmündung angebrachte Einrichtungen, die einen Teil der ausströmenden Pulvergase so nach hinten ablenken, daß am Rohr eine dem Rücklauf entgegengesetzte Reaktionskraft erzeugt wird.

Bild 209 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Mündungsbremse.

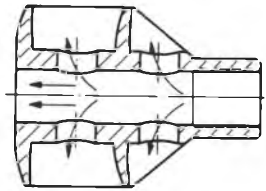


Bild 209. *Aufbau einer Mündungsbremse.*

Zur Beschreibung der Wirksamkeit einer Mündungsbremse sind drei verschiedene Kennzahlen, die Triebziffer, die Leistungsziffer und der Wirkungswert eingeführt worden. Wirkung und Berechnung von Mündungsbremsen sind ausführlich im Abschnitt 9.7, Wirkung einer Mündungsbremse, dargestellt.

2.2. Besondere innenballistische Anordnungen

Neben dem normalen Aufbau der Rohrwaffen, wie er in Abschnitt 2.1.1. beschrieben wurde, sind verschiedene innenballistische Anordnungen mit komplizierterem Aufbau entwickelt worden, die teilweise in der Wehrtechnik (Hoch- und Niederdruck-Rohr, Düsenkanone und konisches Rohr), teilweise aber auch in der Grundlagenforschung (Leichtgaskanone) Anwendung gefunden haben. Über diese Sonderkonstruktionen liegt eine große Zahl von experimentellen und theoretischen Arbeiten vor, auf die hier jedoch nicht eingegangen werden kann; im folgenden werden daher nur die wesentlichen Merkmale dieser Anordnungen aufgezeigt.

2.2.1. Das Hoch- und Niederdruckrohr

In dem Bestreben, einen möglichst flachen Verlauf des Gasdruckes über dem Geschoßweg, d. h. nach Gleichung (13) ein großes η_p zu erreichen,

ist während des Zweiten Weltkrieges in Deutschland das Hoch- und Niederdruckrohr (HN-Rohr) entwickelt worden. Mit dem flachen Druckverlauf sollte bewirkt werden, daß auch Geschosse, die nur einer geringen Beschleunigung standhalten, mit möglichst hoher Geschwindigkeit verschossen werden können.

Das Merkmal des HN-Rohres ist eine zwischen Ladungsraum und Rohr eingebaute Düsenplatte. Sie bewirkt, daß das Treibladungspulver unter hohem Druck im Hochdruckraum abbrennt, drosselt aber die daraus austretenden Pulvergase beim Eintritt in den Niederdruckraum, also das Rohr. Durch geeignete Abstimmung des Hochdruckraumes, der Düsenplatte und des Pulvers läßt sich mit dem HN-Rohr, wie es in Bild 210 schematisch dargestellt ist, tatsächlich ein im Vergleich zu normalen Rohren flaches Gasdruckdiagramm erzeugen. Der idealisierte Verlauf, wie er in Bild 211 gezeigt ist, wird jedoch nicht erreicht. Die Theorie zum HN-Rohr findet sich bei J. CORNER [8].

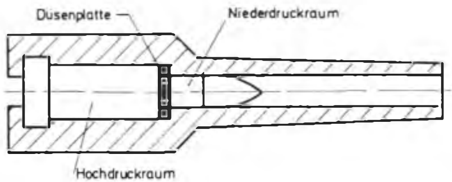


Bild 210. *Schematische Darstellung des Hoch- und Niederdruckrohres.*

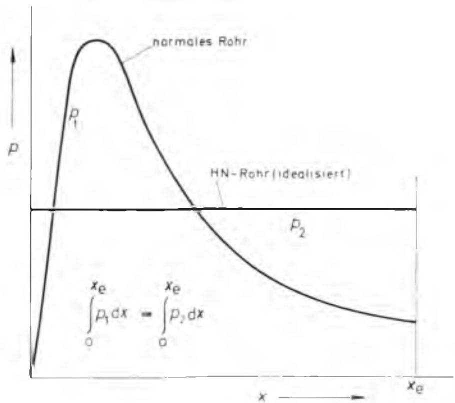


Bild 211. *Vergleich des Gasdruckverlaufs über dem Geschoßweg für das normale Rohr und das HN-Rohr.*

Da man den mit dem HN-Rohr in der Praxis erzielbaren Gasdruckverlauf in höheren Druckbereichen auch durch entsprechende Abstimmung der innenballistischen Parameter eines normalen Rohres erreichen kann, hat das HN-Prinzip heute nur noch im Hinblick auf eine andere innenballistische Aufgabe Bedeutung: Wenn sehr geringe Geschoßgeschwindigkeiten durch den Abbrand von Pulver dargestellt werden sollen, kann man die Schwierigkeit des unvollständigen Pulverabbrandes dadurch umgehen, daß man das Pulver in einem Hochdruckraum abbrennen läßt, der eine vollständige Umsetzung unter hohem Druck gewährleistet.

2.2.2. Die Düsenkanone

Die als Düsenkanone (Düka) oder rückstoßfreies Rohr bezeichnete innenballistische Anordnung findet Verwendung, wenn artilleristische Geräte möglichst leicht sein sollen (für Luftlandeeinsätze o.ä.) oder wenn panzerbrechende Geschosse aus Einmann-Waffen zu verschießen sind.

Das geringe Gewicht größerer Waffen mit rückstoßfreien Rohren ergibt sich aus der leichten Ausführung der Lafetten, die hier nur das Gewicht des Rohres und die damit verbundene Fahrbelastung aufzunehmen haben. Rücklaufeinrichtungen sowie Einrichtungen zur Aufnahme der Bremskräfte fallen fort.

Infanteristische Panzerabwehrwaffen mit rückstoßfreien Rohren werden bei den erforderlichen Geschoßkalibern und den geforderten Kampfentfernungen von der Schulter oder von einem Zweibein abgeschossen.

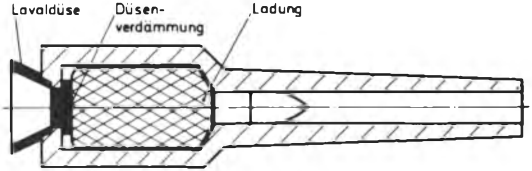


Bild 212. *Schematische Darstellung des rückstoßfreien Rohres.*

Das Prinzip des rückstoßfreien Rohres (Bild 212) besteht darin, daß das Waffenrohr auch hinten eine Öffnung hat, an die sich eine Lavaldüse anschließt.

Nach Zündung der Treibladung baut sich im Verbrennungsraum, der zunächst durch eine Verdämmungsplatte nach hinten abgeschlossen ist, unter definierten Bedingungen ein Gasdruck auf, durch den sich das Geschoß im Rohr nach vorn bewegt. Bei einem bestimmten Druck, dem Berstdruck (etwa 100 bar), bricht die Verdämmungsplatte, und ein Teil der Pulvergase strömt durch die Lavaldüse nach hinten ab. Dadurch greift am Rohr eine Kraft in Schußrichtung an, die bei richtiger Auslegung des Systems den bei der Schußentwicklung erzeugten Rückstoß kompensiert.

Grundsätzlich kann durch diese Anordnung einmal ein während der Schußentwicklung völlig kräftefreies Rohr, das rück*stoß*freie Rohr, dargestellt werden; zum anderen – und dieser Fall ist in der Praxis recht häufig – läßt sich mit Hilfe der rückwärtigen Düse ein rück*lauf*freies Rohr verwirklichen, bei dem sich zwar nicht in jedem Zeitpunkt der Schußentwicklung die Kräfte kompensieren, jedoch die Summe der während des gesamten Schußvorgangs auf das Rohr übertragenen Impulse gleich Null ist, so daß keine merkliche Rohrbewegung auftritt.

Mit den Vorteilen der Düsenkanone sind jedoch folgende Nachteile in Kauf zu nehmen, welche die Anwendung begrenzen:

Sicherheitsbereich nicht nur vor, sondern auch hinter dem Rohr,

erhöhte Knallbelästigung und

erhöhter Pulververbrauch.

Zur Theorie der Düsenkanone siehe CORNER [6].

2.2.3. Das konische Rohr

Geschosse, mit denen eine große Reichweite oder eine große Durchschlagsleistung aufgrund ihrer kinetischen Energie erzielt werden soll, bedürfen einer hohen Anfangsgeschwindigkeit und eines geringen Geschwindigkeitsabfalls während des Fluges. Die hohe Anfangsgeschwindigkeit erfordert eine geringe Querschnittsbelastung (auf den Geschoßquerschnitt bezogene Geschoßmasse), während andererseits ein geringer Geschwindigkeitsabfall neben einem günstigen Widerstandsbeiwert eine große Querschnittsbelastung voraussetzt.

Diesen entgegengesetzten Forderungen kann man einmal durch ein sog. Treibspiegelgeschoß gerecht werden, bei dem die Querschnittsfläche eines Fluggeschosses großer Querschnittsbelastung für den Beschleunigungsvorgang im Rohr durch einen sehr leichten Treibspiegel vergrößert wird. Der Treibspiegel trennt sich nach dem Verlassen des Rohres vom Fluggeschoß (vgl. Abschnitt 11.2.3.2).

Ein anderer Weg ist die Verwendung eines konischen Rohres, wie es in Bild 213 dargestellt ist; aus ihm werden Geschosse nach Bild 214 verschossen.

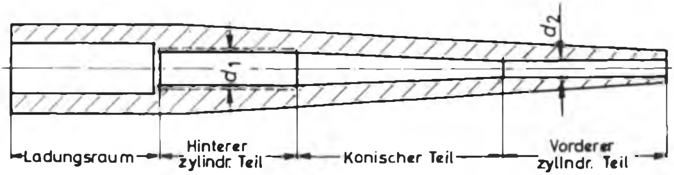


Bild 213. *Konisches Rohr.*

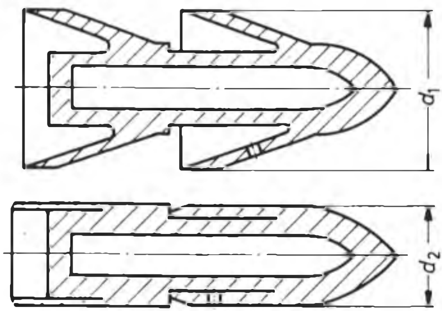


Bild 214. *Geschoß für das konische Rohr; oben vor dem Schuß, unten nach dem Schuß.*

Das konische Rohr besteht aus einem hinteren zylindrischen Teil mit dem Druchmesser d_1, der sich direkt an den Ladungsraum anschließt; dann folgt der konische Teil, der den Übergang vom größeren Durchmesser d_1 zum kleineren Durchmesser d_2 des vorderen zylindrischen Teiles des Rohres darstellt.

Das Geschoß für das konische Rohr hat zwei verformbare Flansche vom Durchmesser d_1, die im konischen Teil des Rohres nach hinten umgelegt werden, bis sie den Durchmesser d_2 erreicht haben.

Zwei Geschoßausführungen für konische Rohre zeigt Bild 1114, wovon das eine (Ausführung b) anstelle des vorderen Flansches fingerhutartige Stauchkörper besitzt.

Das Geschoß wird also hauptsächlich mit einem großen Durchmesser beschleunigt, erfährt dann im Rohr eine Verformung und legt seine Flugbahn mit einem außenballistisch günstigen kleineren Durchmesser zurück.

Die Innenballistik des konischen Rohres weicht insofern von der normaler Rohre ab, als einmal eine starke Geschoßverformung während der Schußentwicklung stattfindet, zum anderen der Rohrquerschnitt nach vorn kleiner wird, die Expansion der Pulvergase über dem Geschoßweg bei gleichzeitiger Steigerung der Querschnittsbelastung also langsamer erfolgt.

Der Energieverlust durch die Geschoßverformung bei einer Verjüngung des konischen Teiles von etwa 1:40 ist als außerordentlich gering festgestellt worden und kann bei der Rechnung vernachlässigt werden. Wenn die Abhängigkeit des Rohrquerschnittes vom Geschoßweg bekannt ist, läßt sich also der innenballistische Ablauf analog zu dem des normalen Rohres berechnen.

Für weitere Angaben über konische Rohre und ihre Geschosse s. Abschnitt 11.2.3.5, Flanschgeschosse für konische Rohre.

Die Drallübertragung auf die Geschosse erfolgte bei den ersten Ausführungen konischer Rohre durch Züge auf dem gesamten Geschoßweg, was mit gewissen Fertigungsschwierigkeiten verbunden war. Spätere Entwicklungen sahen ein Zugprofil nur im hinteren zylindrischen Teil vor, während der konische Teil und der vordere zylindrische Teil des Rohres glatt waren (getrennt gefertigt und aufgesetzt). Der Drallwinkel im hinteren zylindrischen Teil war größer als sonst üblich; während des Durchganges durch den konischen Teil erhöhte sich die Drehzahl des Geschosses weiter aufgrund des abnehmenden Trägheitsmomentes um die Längsachse entsprechend dem Drehimpulssatz.

Eine ausführliche Übersicht über die Ergebnisse mit konischen Rohren findet sich bei H. NEUFELDT [9]; bei CORNER [6] sind auch die theoretischen Ansätze zu deren Innenballistik zusammengefaßt.

2.2.4. Die Leichtgaskanone

In Abschnitt 2.1.3. ist auf die Frage nach der mit normalen Rohren erreichbaren maximalen Geschoßgeschwindigkeit eingegangen worden. Diese Grenzgeschwindigkeit kommt dadurch zustande, daß ein Druckgefälle zwischen Rohrboden und Geschoßboden auftritt, wie in Abschnitt 2.1.5.2 erläutert.

Wenn nun die Schallgeschwindigkeit in den Schwaden groß genug wäre, um die Druckunterschiede zwischen Rohrboden und Geschoßboden hinreichend schnell auszugleichen, dann wären höhere Grenzgeschwindigkeiten zu erwarten.

Für die Schallgeschwindigkeit a in Gasen gilt

$$a = \sqrt{\kappa \frac{R_0}{M} T} \tag{68}$$

mit R_0 als universeller Gaskonstante, T als Temperatur und M als Molmasse.

Bei konstanter Temperatur steigt die Schallgeschwindigkeit also mit abnehmendem Molekulargewicht der Gase. Daher können mit Wasserstoff (H_2) oder Helium (He) als Treibgas höhere Grenzgeschwindigkeiten erzielt werden.

Diese Erkenntnis nutzt man in sog. Leichtgaskanonen aus. Zunächst ist man so vorgegangen, daß Helium durch Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff im Rohr aufgeheizt und das Geschoß durch den dabei entstehenden Druck angetrieben wurde. Mit sehr leichten Geschossen (Kunststoff) sind damit beim Schießen im Vakuum Geschwindigkeiten von etwa 4000 m/s erreicht worden.

Neuere Leichtgaskanonen haben einen Aufbau, wie ihn Bild 215 schematisch darstellt. Mit Hilfe einer normalen Treibladung wird ein Kolben in den mit Helium oder Wasserstoff gefüllten Leichtgasraum getrieben; dabei heizt sich das leichte Treibgas, im allgemeinen durch vom Kolben ausgehende Verdichtungswellen, auf. Es kommt zu einem Druckanstieg, durch den das Geschoß beschleunigt wird. Auf diese Weise sind Geschoßgeschwindigkeiten von etwa 6000 m/s erzielt worden.

Die Bedeutung der Leichtgaskanone liegt insbesondere in ihrer Anwendung für die Weltraumforschung. So wurden die Fragen der

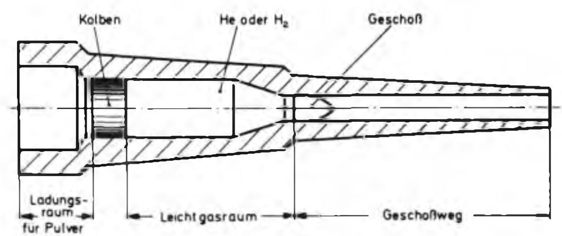


Bild 215. *Leichtgaskanone, prinzipieller Aufbau.*

Flugstabilität und der Erwärmung von Kapseln beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre in umfangreichen Untersuchungen an Modellkörpern geklärt, die aus Leichtgaskanonen verschossen wurden. Einzelheiten über Leichtgaskanonen finden sich bei C. L. LECOMTE [10].

2.3. Innere Ballistik der Raketen

An der Raumfahrttechnik, aus der inzwischen einer der modernsten Industriezweige entstanden ist, hat der Raketenantrieb, also die innere Ballistik der Rakete, einen entscheidenden Anteil. Wenn es heute gelingt, Weltraumkapseln bzw. -fahrzeuge mit einer Masse von mehr als 10 t aus dem Schwerefeld der Erde heraus zu befördern und ihnen darüber hinaus große Reisegeschwindigkeiten im interplanetaren Raum zu geben, so war die Entwicklung von Raketentriebwerken entsprechender Leistung die erste Voraussetzung dazu.

Das umfangreiche Gebiet der Raketeninnenballistik kann in diesem Rahmen naturgemäß nur in Form einer kurzen Übersicht abgehandelt werden, wobei auf die Feststoffraketen wegen ihrer besonderen wehrtechnischen Bedeutung etwas näher eingegangen werden soll.

Die allgemeinen Konstruktionsprinzipien von Raketen und der Aufbau militärischer Raketen werden in Kap. 12 beschrieben.

2.3.1 Allgemeines

Der die Rakete antreibende Schub entsteht dadurch, daß ein Teil der Raketenmasse (der Treibstoff) durch eine rückwärtige Öffnung (die Düse) mit hoher Geschwindigkeit austritt.

Wenn aus einem geschlossenen System der Masse m, wie es eine Rakete darstellt, die sich im luftleeren und gravitationsfreien Raum befinden soll, ein Teil der Masse dm mit der Geschwindigkeit u_{eff} in einer Richtung ausgestoßen wird, dann erfährt die restliche Masse des Systems nach dem Impulssatz einen Geschwindigkeitszuwachs dv in umgekehrter Richtung:

$$dm \, u_{eff} = -m \, dv. \qquad (69)$$

Aus Gleichung (69) folgt

$$\frac{dm}{dt} u_{eff} = -m \frac{dv}{dt}, \qquad (70)$$

d.h., das Produkt aus Austrittsgeschwindigkeit und je Zeiteinheit austretender Masse ist gleich der auf das Restsystem wirkenden Antriebskraft. Dieses Produkt wird als Schub S bezeichnet:

$$S = \frac{dm}{dt} u_{eff}. \tag{71}$$

Für den einfachen Fall, daß keine äußeren Kräfte auf die Rakete einwirken, läßt sich durch Integration von Gleichung (69) die Raketengeschwindigkeit v zu jedem Zeitpunkt direkt angeben:

$$v = u_{eff} \ln \frac{m_o}{m(t)} \tag{72}$$

mit m_o als Startmasse und m(t) als momentaner Masse der Rakete.

Die Endgeschwindigkeit v_E der einstufigen Rakete beträgt

$$v_E = u_{eff} \ln \frac{m_o}{m_r}, \tag{73}$$

worin m_r die Masse der ausgebrannten Rakete, also die Differenz aus Startmasse und Treibstoffmasse, bedeutet.

Der Quotient

$$\mu = \frac{m_o}{m_r} \tag{74}$$

ist das Massenverhältnis der Rakete.

Aus Gleichung (73) erkennt man, daß um so größere Endgeschwindigkeiten erreicht werden, je größer einmal die Austrittsgeschwindigkeit u_{eff}, zum anderen das Massenverhältnis μ ist.

2.3.2 Antriebsarten

Zur Erzeugung des nach hinten austretenden Massenstrahls der Rakete sind verschiedene Verfahren möglich, von denen einige technisch realisiert sind und andere sich, insbesondere für Weltraumprojekte, im Forschungsstadium befinden.

Es ergibt sich etwa folgende Einteilung der Antriebsarten:

Raketen mit chemischem Antrieb, nämlich

Feststoffraketen,
Flüssigkeitsraketen,
hybride Raketen;

Raketen mit Antrieb durch thermische Kernenergie,

Raketen mit elektrischem Antrieb und

Raketen mit Photonenantrieb.

Bei den Raketen mit *chemischem* Antrieb wird in der Brennkammer durch exotherme Umsetzung eines festen Treibstoffs, von Flüssigkeiten oder einem festen Brennstoff und einem flüssigen Sauerstoffträger (hybride Rakete) unter einem Druck bis annähernd 200 bar Gas mit einer Temperatur bis etwa 3000 K erzeugt. Dieses Gas expandiert durch eine Lavaldüse (stoßfreier Druckabbau) und erreicht dabei Überschallgeschwindigkeit.

Zum innenballistischen Aufbau von *Feststoffraketen* wird in Abschnitt 2.3.4. einiges ausgeführt.

Den schematischen Aufbau eines Flüssigkeitstriebwerkes zeigt Bild 216.

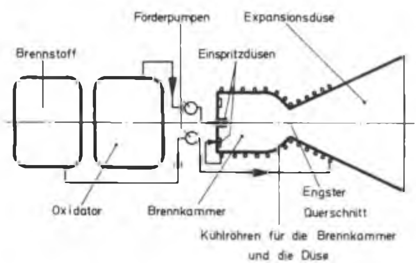


Bild 216. *Schema eines Flüssigkeitsraketenmotors.*

Die Vorräte an Brennstoff und Oxidator befinden sich in getrennten Behältern. Durch Förderpumpen werden beide Komponenten über Einspritzdüsen in der Brennkammer in Kontakt gebracht, wo sie entweder spontan (hypergole Treibstoffe) oder durch äußere Zündung miteinander reagieren, wodurch gasförmige Produkte entstehen, die durch den engsten Querschnitt austreten und in der anschließend erweiterten Düse expandieren. Im allgemeinen wird, je nach chemischer Zusammensetzung, der Brennstoff oder der Oxidator vor Eintritt in die Einspritzdüsen zur Kühlung der Brennkammerwand benutzt.

Bild 217 zeigt den Aufbau eines hybriden Raketenmotors. Die Brennkammer enthält den festen Brennstoff, während der flüssige Oxidator mit Hilfe einer Förderpumpe über Einspritzdüsen zugeführt wird. Das hybride Triebwerk hat, wie auch das Flüssigkeitstriebwerk, gegenüber dem reinen Feststofftriebwerk den Vorteil, daß es abgeschaltet werden kann.

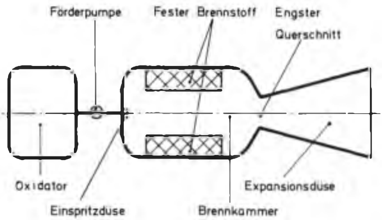


Bild 217. *Schema eines hybriden Raketenmotors.*

Anstelle von Förderpumpen werden für den Flüssigkeitstransport auch Preßgase und Ventile verwendet.

Auf die chemische Zusammensetzung von Raketentreibstoffen wird im Kap. 1, Explosivstoffe, eingegangen.

Durch *thermische Kernenergie* angetriebene Raketen haben einen Aufbau, wie er in Bild 218 dargestellt ist.

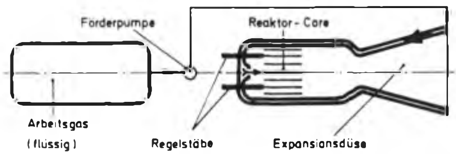


Bild 218. *Schema eines Raketenantriebs durch thermische Kernenergie.*

Das Arbeitsgas wird über ein Reaktor-Core geleitet und dort aufgeheizt; dann tritt es durch die Expansionsdüse aus. Als Arbeitsgas wird vorzugsweise Wasserstoff diskutiert, weil damit wegen seines geringen Molekulargewichtes bei vorgegebener Betriebstemperatur des Reaktors der höchste spezifische Impuls erreicht wird.

Während bei chemischen Triebwerken und (wegen der zulässigen Reaktortemperatur) auch bei solchen mit thermischer Kernenergie die Ausströmgeschwindigkeit eine Grenze von annähernd 4000 m/s nicht überschreiten kann, sind mit elektrischen Antrieben Ausströmgeschwindigkeiten möglich, die grundsätzlich nur durch relativistische Effekte begrenzt sind.

In einem *elektrischen Raketenantrieb* (Bild 219) wird der Arbeitsstoff in einen Verdampfer gefördert und nachfolgend ionisiert, damit er schließlich in einem elektrostatischen Feld beschleunigt werden kann. Als Arbeitsstoffe kommen die Metalle Quecksilber, Kalium, Rubidium

und Cäsium in Frage, da sich diese Elemente durch ein geringes Ionisierungspotential bei großem Atomgewicht auszeichnen.

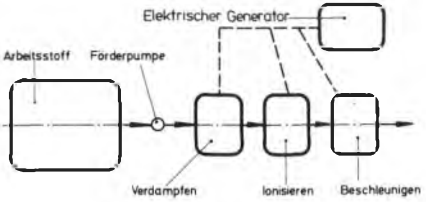


Bild 219. *Schema eines elektrischen Raketenantriebes.*

Für Weltraummissionen von großer Zeitdauer sind theoretische Überlegungen zur Anwendung von *Photonenantrieben* angestellt worden. Dabei geht man davon aus, daß bei der Emission elektromagnetischer Strahlung, die in Form von Energiequanten (Photonen) erfolgt, der Strahler einen Rückstoß erfährt. Jedes Photon überträgt einen Impuls h/λ, wobei h die Plancksche Konstante und λ die Wellenlänge der Strahlung ist.

Um durch elektromagnetische Strahlung einen hinreichend großen Schub zu erreichen, ist eine Dichte des Photonenstromes erforderlich, wie sie bisher nicht erreicht werden konnte. Man denkt auch daran, die Photonen durch Paarzerstrahlung von Materie zu erzeugen.

Neben den hier kurz erläuterten Raketenantrieben finden für Flugkörper auch Staustrahltriebwerke (luftatmende Triebwerke) Anwendung, bei denen nur der Brennstoff mitgeführt und als Oxidator der Luftsauerstoff verwendet wird. Staustrahltriebwerke können deshalb nur bis zu Höhen von etwa 30 km eingesetzt werden.

2.3.3. Berechnung des Schubes und Auslegung der Düse

Der Schub ergibt sich aus Gleichung (71), wenn die Expansionsdüse adaptiert, d.h. so ausgelegt ist, daß der Gasdruck am größten Querschnitt der Düse den gleichen Wert hat wie der Außendruck.

Diese Adaption ist bei Höhenraketen nur für den einer bestimmten Höhe entsprechenden Druck möglich. Daher ist die Schubgleichung für den allgemeinen Fall durch ein Glied zu erweitern, das den Unterschied zwischen dem Enddruck an der Düse p_e und dem Außendruck p_a berücksichtigt:

$$S = \frac{dm}{dt} v_E + A_e (p_e - p_a). \tag{75}$$

Für die Berechnung des Schubes ist nun die Kenntnis der Temperatur T_0 und des Druckes p_0 in der Brennkammer sowie des engsten Querschnitts A_t und des Endquerschnittes A_e der Düse erforderlich.[1]) Mit Hilfe der Gleichungen

$$\frac{dm}{dt} = \sqrt{\frac{\kappa}{R\,T_0}} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} A_t\, p_0 , \tag{76}$$

$$u_{eff} = \sqrt{\frac{2\kappa\, R T_0}{\kappa-1} \left(1 - \frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \tag{77}$$

und

$$\frac{A_e}{A_t} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \sqrt{\frac{\kappa-1}{\kappa+1}} \; \frac{\left(\frac{p_0}{p_e}\right)^{\frac{1}{\kappa}}}{\sqrt{1-\left(\frac{p_0}{p_e}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}}} \tag{78}$$

kann dann der Betrag des Schubes ermittelt werden; dabei ist R die individuelle Gaskonstante.

Wenn die Düse und die Verhältnisse in der Brennkammer vorgegeben sind, wird man zunächst nach Gleichung (78) den Quotienten p_0/p_e bestimmen. Das kann mit Hilfe der Kurvenschar in Bild 220 geschehen, in dem für verschiedene κ-Werte die Beziehung zwischen A_e/A_t und p_0/p_e gemäß Gleichung (78) dargestellt ist.

Mit p_0/p_e kann nach Gleichung (77) die Austrittsgeschwindigkeit u_{eff} berechnet werden. Gleichung (76) ist dann direkt auswertbar. Bei bekanntem Außendruck ist mit

$$p_e = p_0 \left(\frac{p_0}{p_e}\right)^{-1} \tag{79}$$

auch der zweite Summand in Gleichung (75) zu berechnen.

Soll die Düse für ein bestimmtes Expansionsverhältnis p_0/p_e ausgelegt werden, so ist nach Gleichung (78) bzw. Bild 220 das Verhältnis vom Endquerschnitt zum engsten Querschnitt A_e/A_t zu ermitteln. Der engste Querschnitt ist im allgemeinen durch die Auslegung der Brennkammer festgelegt, so daß damit auch A_e festliegt.

---

[1]) Die Berechnung des Zustandes in den Brennkammern wird für Feststofftriebwerke in Abschnitt 2.3.4. angegeben.

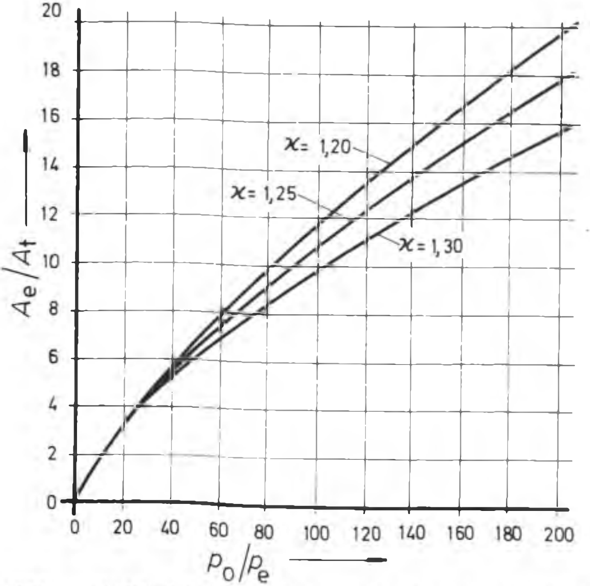


Bild 220. *Abhängigkeit des Flächenverhältnisses A_e/A_t vom Druckverhältnis p_o/p_e für verschiedene κ-Werte.*

Klassische Düsenformen sind der gerade Kegel (Bild 221) und die Glocke (Bild 222). Bei der Ausführung als gerader Kegel soll der halbe Öffnungswinkel einen Wert von 15° nicht überschreiten ($\alpha \leq 15°$), damit die Strömung nicht abreißt. Eine abreißende Strömung mit der Ausbildung von Wirbeln als Folge würde zu einer Herabsetzung des Wirkungsgrades der Düse führen.

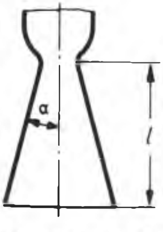


Bild 221. *Kegelförmige Düse.*

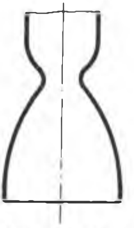


Bild 222. *Glockenförmige Düse.*

Die Länge l der Düse berechnet sich nach dieser Forderung mit d_t als kleinstem und d_e als größtem Durchmesser zu

$$\frac{d_e - d_t}{2\,l} \leq \tan 15^\circ\,. \tag{80}$$

Wird eine Düse in Form eines geraden Kegels auf große Höhen adaptiert, dann ergeben sich beträchtliche Längen. Glockenförmige Düsen können kürzer gebaut werden. Indem man den zunächst sehr großen Öffnungswinkel zum Düsenende hin zu kleinen Werten auslaufen läßt, wird ein Abreißen der Strömung vermieden.

Neben diesen klassischen Düsenformen finden auch Ringdüsen Verwendung, wenn dies aus konstruktiven Gründen nützlich ist. Eine besondere Ausführung der Ringdüse ist die „aerodynamic spike nozzle", bei der die äußere Strömungsbegrenzung durch den umgebenden Atmosphärendruck erfolgt. So kann eine recht gute automatische Höhenadaption erreicht werden.

Für Abschätzungen zur Auslegung eines Raketentriebwerkes ist der spezifische Impuls I_s eine nützliche Größe:

$$I_s = \frac{S}{dm/dt} \text{ (in m/s)}\,. \tag{81}$$

Wenn für einen Antrieb mit dem Schub S und der Brenndauer t der erforderliche Treibstoff m_c berechnet werden soll, geht man von

$$m_c = \frac{S \cdot t}{I_s} \tag{82}$$

aus.

Der spezifische Impuls hängt vom Brennkammerdruck und der Adaption der Düse ab.

Für Feststofftreibsätze kann man mit I_s = 2000 bis 2500 m/s und für flüssige Treibmittel mit I_s = 2500 bis 4500 m/s rechnen.

2.3.4. Berechnung des Brennkammerdruckes von Feststoffraketen

Feststoffantriebe haben besondere Bedeutung für Artillerieraketen kleiner und mittlerer Reichweite sowie für nachbeschleunigte Geschosse, weil sie – im Gegensatz zu Flüssigkeitsraketen – jederzeit ohne besondere Maßnahmen einsatzbereit sind. Flüssigkeitsraketen können wegen der Natur ihrer Treibmittel (flüssiger Sauerstoff o.ä.) erst kurz vor dem Start betankt werden. Ausnahmen bilden bestimmte Treibstoff/Oxidator-Zusammensetzungen, die sich für ein „pre-package" eignen.

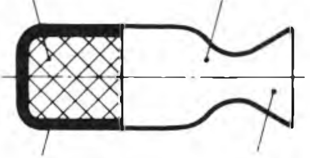


Bild 223. *Schema eines Feststoffantriebes (Stirnbrenner).*

Der Aufbau eines Feststoffantriebes ist in Bild 223 dargestellt. In die Brennkammer ist ein Pulverkörper eingebracht, der nach der Zündung mit definierter Oberfläche abbrennt. Oberflächen, von denen aus kein Abbrand stattfinden soll, werden durch geeignete Materialien isoliert. Der Druck in der Brennkammer läßt sich aus den thermodynamischen Werten des Treibmittels und aus den geometrischen Abmessungen der Düse berechnen.

Das beim Abbrand des Pulvers entstehende Gas führt einerseits zu einem Druckaufbau in der Brennkammer, zum anderen strömt aufgrund des Druckunterschiedes zwischen Innen- und Außenraum ein Teil der Gase durch die Düse ab. Der Pulverabbrand ist druckabhängig. Bei der Erfassung der Verhältnisse in der Brennkammer geht man daher von einer Massenbilanz zwischen umgesetztem Pulver, dem in der Brennkammer vorhandenen und dem durch die Düse abströmenden Gas aus:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = m_c \frac{dz}{dt} - \sqrt{\frac{\kappa}{RT}} \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} A_t p. \qquad (83)$$

Darin bedeutet ρ die Dichte, V das Volumen, T die Temperatur und p den Druck der Gase in der Brennkammer; m_c ist die anfängliche Treibladungsmasse und z deren umgesetzter Anteil.

Das rechte Glied von Gleichung (83) wird zweckmäßigerweise abgekürzt geschrieben:

$$\sqrt{\frac{\kappa}{RT}} \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} A_t p = \frac{f(\kappa)}{a} A_t p \qquad (84)$$

mit der Schallgeschwindigkeit

$$a = \sqrt{\kappa RT} \qquad (85)$$

und der dimensionslosen Größe

$$f(\kappa) = \kappa \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} \qquad (86)$$

Es gilt ferner

$$\rho = \frac{\kappa}{a^2}\, p \qquad (87)$$

und

$$V = V_K - \frac{1}{\rho_c}\,(1 - z)\, m_c, \qquad (88)$$

wobei V_K das Kammervolumen und ρ_c die Dichte des Treibladungspulvers ist.

Wenn man die Gleichungen (83) bis (88) zusammenfaßt, erhält man unter der Annahme, daß die Gastemperatur in der Brennkammer während des gesamten Antriebsvorganges konstant ist (T_0 = const. → a_0 = const.):

$$\frac{\kappa}{a_0^2}\left\{\frac{dp}{dt}\left[V_K - \frac{1}{\rho_c}(1 - z)\, m_c\right] + p\frac{m_c}{\rho_c}\frac{dz}{dt}\right\} = m_c \frac{dz}{dt} - \frac{f(\kappa)}{a_0} A_t p. \qquad (89)$$

Wenn man in Gleichung (89) das Abbrandgesetz

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\rho_c S(z)}{m_c}\left(a + b\frac{p}{p^*}\right) \qquad (90a)$$

oder

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\rho_c S(z)}{m_c}\, b \left(\frac{p}{p^*}\right)^n \qquad (90b)$$

mit S(z) als momentane Oberfläche des Pulverkörpers und p* als Standarddruck einführt, kann der Druckverlauf über der Zeit in der Brennkammer grundsätzlich berechnet werden. Die Lösung ist jedoch im allgemeinen Fall nur mit numerischen Methoden möglich.

Setzt sich der Pulverkörper mit konstanter Oberfläche S_0 um, dann läßt sich der stationäre Druck p_0 in der Brennkammer berechnen (dp/dt = 0). Unter Voraussetzung von Gleichung (90b) und $\rho_c \gg \rho$ gilt

$$p_0 = \left(\frac{a_0 \rho_c b}{f(\kappa) p^*}\right)^{\frac{1}{n-1}} K^{\frac{1}{1-n}} \qquad (91)$$

Darin bedeutet

$$K = S/A_t \qquad (92)$$

die Klemmung. Pulverkörper, die mit konstanter Oberfläche abbrennen, sind entweder Stirnbrenner oder Innenbrenner mit Querschnitten nach Bild 224.



Bild 224. *Querschnitte von Pulverkörpern, die mit konstanter Oberfläche abbrennen.*

2.3.5. Stufenraketen

In Abschnitt 2.3.1 wurde auf die ideale Endgeschwindigkeit der Rakete eingegangen, die sich nach

$$v_E = u_{eff} \ln \mu \tag{93}$$

berechnet.

Da für chemische Triebwerke $u_{eff} \leqslant 4000$ m/s ist und andere Triebwerke bisher in ausreichender Größe nicht zur Verfügung stehen, würden Trägerraketen für Satelliten, Mondfahrzeuge oder interplanetare Sonden wegen der erforderlichen Endgeschwindigkeiten von etwa 10000 m/s Massenverhältnisse von $\mu \approx 12$ erfordern. Solche Massenverhältnisse sind technisch kaum realisierbar und würden darüber hinaus gegenüber Raketen nach dem Stufenprinzip unwirtschaftlich sein.

Bei Stufenraketen beschleunigt zunächst eine erste Stufe die Gesamtrakete bis zum Ausbrand, dann wird der leere Teil der ersten Stufe abgesprengt und die zweite Stufe gezündet usw. Durch Mehrstufenraketen lassen sich mit ungünstigerem anfänglichen Massenverhältnis wesentlich höhere Endgeschwindigkeiten erreichen, weil während der Antriebsphase nach Ausbrand jeder Stufe die nicht mehr erforderlichen Bauteile abgetrennt werden, also keine mitgeführte Energie (Treibstoff) mehr zu deren Beschleunigung verbraucht wird.

Die Endgeschwindigkeit der k-ten Stufe ist

$$v_k = \sum_{i=1}^{k} (u_{eff})_i \ln \mu_i \tag{94}$$

mit

$$\mu_i = \frac{m_{oi}}{m_{ri}}. \tag{95}$$

Die Startmasse der Rakete ist m_{01}; die Differenz von Startmasse m_{01} und Treibstoffmasse der ersten Stufe m_{c1}

$$m_{r1} = m_{01} - m_{c1}. \tag{96}$$

Für die zweite Stufe gilt entsprechend

$$\mu_2 = \frac{m_{01} - m_{R1}}{m_{01} - m_{R1} - m_{c2}}, \tag{97}$$

wobei m_{R1} die Masse der abgesprengten leeren Teile einschließlich der ausgebrannten Treibstoffmasse der ersten Stufe und m_{c2} die Treibstoffmasse der zweiten Stufe ist.

Die Betrachtung läßt sich für weitere Stufen sinngemäß fortsetzen.

Literatur

|1| Schardin, H.: Bemerkungen zum Druckausgleichsvorgang in einer Rohrleitung. Phys. Z. 33 (1932), S. 60.

|2| Germersnausen, R.; Witt, W.; Melchior, E.: Thermodynamisches Modell der Innenballistik. – I. Feste Treibstoffe, mit konstanter Oberfläche abbrennend, Wehrtechnik 3 (1971), S. 281/288.

|3| Résal, H.: Recherches sur le mouvement des projectiles dans les armes à feu. Paris 1864.

|4| Oswatitsch, K.: Gasdynamik. Wien 1952.

|5| Kutterer, R. E.: Ballistik, 3. Aufl., Braunschweig 1959.

|6| Corner, J.: Theory of the Interior Ballistics of Guns. New York 1950.

|7| Witt, W.; Melchior, E.: Thermodynamisches Modell der Innenballistik. — II. Feste Treibstoffe, progressiv oder degressiv abbrennend. Wehrtechnik 6 (1974), S. 222/225, 288/292.

|8| Corner, J.: A Theory of the Internal Ballistics of the Hoch- und Niederdruck-Kanone. J. Franklin Inst. 246 (1948), S. 233/248.

|9| Neufeldt, H.: Hochleistungswaffen mit konischen Rohren für die Deutsche Wehrmacht im 2. Weltkrieg.
Wehrt. Monatsh. 64 (1967), S. 144/155; 226/238.

|10| Lecomte, C. L.: Lancement de Maquettes à Grande Vitesse. In: Vollrath, K.; Thomer, G.: Kurzzeitphysik. Wien 1967.

3. Äußere Ballistik

Die äußere Ballistik befaßt sich mit der Messung und Beschreibung der Bewegung, die ein Körper nach dem Abschuß unter dem Winkel ϑ_0 mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 ausführt. Im engeren Sinne versteht man unter äußerer Ballistik die Verfolgung der Flugbahn, die ein verschossenes Projektil (antriebsfreies Projektil) im Gravitationsfeld der Erde (Erdanziehung) gegen den Luftwiderstand ausführt (Abschnitt 3.2). Erfolgt die Bewegung nur unter dem Einfluß der Erdbeschleunigung, so spricht man von Vakuumballistik (Abschnitt 3.1). Die äußere Ballistik behandelt aber auch die Flugbahnen nachbeschleunigter Projektile (Raketen) (Abschnitt 3.3) und als Sonderfall des Schusses in der Bombenballistik (Abschnitt 3.4) den Abwurf von Projektilen.

Bei der physikalischen Unterteilung des gesamten Schußvorganges steht die äußere Ballistik also zwischen der Abgangsballistik (Kap. 4) und der Endballistik (Wirkung im Ziel).

3.1. Die Geschoßbahn im luftleeren Raum

Berücksichtigt man im einfachsten Fall allein eine konstante Erdbeschleunigung von $g = 9{,}81\ m/s^2$ [1] unter gleichzeitiger Vernachlässigung von Erdkrümmung und Erdrotation (Abschnitt 3.2.2.4), so wird die Wirklichkeit in einigen Fällen recht gut erfaßt. Das gilt z.B. für sehr große Höhen, bei kleinen Geschoßgeschwindigkeiten oder großen Geschoßgewichten. Diese Rechnungen sind mit den angegebenen Näherungen besonders für Abschätzungen geeignet. Sie führen wegen des fehlenden Luftwiderstandes zu jeweils größten Schußweiten.

3.1.1. Die Flugbahn

Die Flugbahn läßt sich aus der Newtonschen Bewegungsgleichung in x- und y-Richtung

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = 0 \tag{1}$$

und

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -mg \tag{2}$$

mit den Anfangsbedingungen ($t = 0$)

$$x = 0, \tag{3}$$

$$y = 0, \tag{4}$$

1) Genauer: $g = 9{,}780\,490\,(1 + 0{,}005\,2884 \sin^2\beta - 0{,}000\,0059 \sin^2 2\beta)$, wobei β die geographische Breite bedeutet.

$$\frac{dx}{dt} = v_0 \cos \vartheta_0 \tag{5}$$

und

$$\frac{dy}{dt} = v_0 \sin \vartheta_0 \tag{6}$$

berechnen; dabei bedeutet

- x die horizontale Flugbahnkoordinate,
- y die vertikale Flugbahnkoordinate,
- t die Flugzeit im Bahnpunkt (x, y),
- ϑ_0 den Abgangswinkel,
- m die Geschoßmasse.

Durch Integration der Gleichungen (1) und (2) erhält man mit den Anfangsbedingungen (3) und (4) die Koordinaten eines beliebigen Flugbahnpunktes zur Zeit t:

$$x = v_0 t \cos \vartheta_0 \tag{7}$$

und

$$y = v_0 t \sin \vartheta_0 - \frac{g}{2} t^2, \tag{8}$$

woraus sich nach Elimination der Zeit t die Flugbahngleichung

$$y = x \tan \vartheta_0 - \frac{g x^2}{2 v_0^2 \cos^2 \vartheta_0} \tag{9}$$

ergibt. Das ist eine Parabel, die symmetrisch zu den Gipfelkoordinaten x_G und y_G liegt.

Bild 301 zeigt eine Flugbahnparabel mit den Bezeichnungen der wichtigsten Größen.

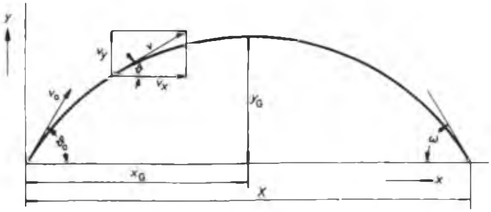


Bild 301. *Flugbahnparabel.*

Aus den Gleichungen (7) bis (9), (12) und (13) lassen sich die in der Tabelle 301 zusammengestellten Beziehungen gewinnen.

Tabelle 301. *Formeln zur Flugbahnberechnung.*

	Im luftleeren Raum	
	Abschußhöhe = Zielhöhe	Abschußhöhe y_0 ‡ Zielhöhe z.B. Bombenwurf
x Abszisse eines beliebigen Flugbahnpunktes	$v_0 t \cos \vartheta_0$	$v_0 t \cos \vartheta_0$
y Ordinate eines beliebigen Flugbahnpunktes	$v_0 t \sin\vartheta_0 - \frac{g}{2} t^2$	$y_0 + v_0 t \sin \vartheta_0 - \frac{g}{2} t^2$
t Flugzeit im Bahnpunkt (x, y)	$\frac{x}{v_0 \cos \vartheta_0}$	$\frac{x}{v_0 \cos \vartheta_0}$
v_x Komponente der Geschwindigkeit v in x-Richtung	$v_0 \cos \vartheta_0$	$v_0 \cos \vartheta_0$
v_y Komponente der Geschwindigkeit v in y-Richtung	$v_0 \sin \vartheta_0 - g t$	$v_0 \sin \vartheta_0 - g t$
v Geschwindigkeit im Bahnpunkt (x, y)	$\sqrt{v_0^2 - 2 g y}$	$\sqrt{v_0^2 - 2 g y}$
x_G Abszisse des Gipfelpunktes der Flugbahn	$\frac{v_0^2}{2g} \sin 2 \vartheta_0$	$\frac{v_0^2}{2g} \sin 2 \vartheta_0$
y_G Ordinate des Gipfelpunktes der Flugbahn	$y_0 + \frac{v_0^2}{2g} \sin^2 \vartheta_0$	$\frac{v_0^2}{2g} \sin^2 \vartheta_0 = \frac{g}{8} T^2$
t_G Flugzeit im Gipfelpunkt (x_G, y_G)	$\frac{v_0}{g} \sin \vartheta_0$	$\frac{v_0}{g} \sin \vartheta_0$
X Schußweite	$\frac{v_0^2}{g} \sin 2 \vartheta_0$	$\frac{v_0^2}{2g} \sin 2 \vartheta_0 + \sqrt{(\frac{v_0^2}{2g} \sin 2\vartheta_0)^2 + \frac{2 v_0^2}{g} y_0 \cos^2 \vartheta_0}$
T Gesamtflugzeit	$\frac{2 v_0}{g} \sin \vartheta_0$	$\frac{1}{g} (\sqrt{v_0^2 \sin^2 \vartheta_0 + 2 g y_0} + v_0 \sin \vartheta_0)$
v_E Endgeschwindigkeit	v_0	$\sqrt{v_0^2 + 2 g y_0}$
X_m Maximale Schußweite	$\frac{v_0^2}{g}$	$\frac{1}{g} \sqrt{v_0^2 + 2 g y_0}$
y_m Maximale Schußhöhe (vertikal)	$\frac{v_0^2}{2g}$	$y_0 + \frac{v_0^2}{2g}$

Geländewinkel $\gamma \neq$ Null	Im lufterfüllten Raum für rasante Bahnen nach d'Antonio[3]) Machsche Zahl $M > 1{,}5$
$v_0 t \cos\vartheta_0$	$\frac{v_{x0}\, t}{1 + a^* v_{x0}\, t}$ [4, 5])
$x \tan\vartheta_0 - \frac{g x^2}{2 v_0^2 \cos^2\vartheta_0}$	$x \tan\vartheta_0 - \frac{g}{2} t^2 (1 - \frac{2}{3} a^* x)$
$\frac{x}{v_0 \cos\vartheta_0}$	$\frac{x}{v_{x0}(1 - a^* x)}$
	$v_{x0}(1 - a^* x)^2$
	$v_x \tan\vartheta_0 - \frac{g}{3 a^* v_{x0}} (\frac{1}{1 - a^* x} \quad (1 - a^* x)^2$
	$v_0 (1 - a^* x)^2$
	$\frac{X}{2} \frac{1 - \frac{1}{6} a^* X}{1 - \frac{1}{2} a^* X}$ [6])
	$\frac{g}{2} T^2 \frac{x_G^2}{X^2} (1 - \frac{a^* X}{2})^2 (1 - \frac{a^* x_G}{3})$
	$\frac{x_G}{v_{x0}(1 - a^* x_G)}$
$\frac{2 v_0^2}{g} \frac{\cos^2\vartheta_0}{\cos\gamma} (\tan\vartheta_0 - \tan\gamma)$ [1])	$\frac{1}{a^*} (1 - \sqrt{\frac{v_{xE}}{v_{x0}}})$
$\frac{2 v_0}{g} \cos\vartheta_0 (\tan\vartheta_0 - \tan\gamma)$ [2])	$\frac{X}{v_{x0}(1 - a^* X)}$
	$v_0 (1 - a^* X)^2$
$\frac{v_0^2}{g(1 + \sin\gamma)}$	

1) Identisch mit Gleichung (12).
2) Identisch mit Gleichung (13).
3) Nach Abschnitt 3.2.2.2.3.
4) $v_{x0} = v_0 \cos\vartheta_0$.
5) $a^* = a/\cos\vartheta_0$; a ergibt sich aus Gleichung (102).
6) In guter Näherung; exakt gilt $\frac{1}{a^*}\left(1 - \sqrt[3]{\frac{(1 - a^* X)^2}{1 - \frac{a^* X}{2}}}\right)$.

Von diesen Gleichungen soll hier wegen ihrer praktischen Bedeutung nur die Beziehung zwischen Gipfelhöhe y_G und Gesamtflugzeit T

$$y_G = \frac{g}{8} T^2 \tag{10}$$

erwähnt werden. Diese in der Literatur als Hauptsche Gleichung bekannte Beziehung gilt exakt nur im luftleeren Raum, kann aber auch im lufterfüllten Raum in guter Näherung zur Abschätzung der Gipfelhöhe benutzt werden [1].

3.1.2. Die Sicherheitsparabel

Variiert man bei gegebener Anfangsgeschwindigkeit v_0 den Abgangswinkel ϑ_0, so erhält man eine Flugbahnschar mit einer zur y-Achse symmetrischen Parabel als Umhüllende (Bild 302)

$$y = \frac{v_0^2}{2g} - \frac{gx^2}{2v_0^2} . \tag{11}$$

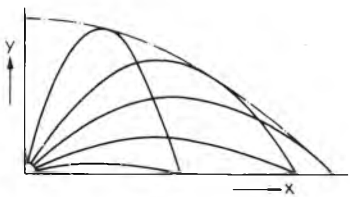


Bild 302. *Sicherheitsparabel.*

Außerhalb dieser sogenannten Sicherheitsparabel kann kein Ziel mit der gegebenen v_0 getroffen werden. Jeder Punkt *auf* der Umhüllenden kann nur durch *eine* Flugbahn erreicht werden, alle Ziele *innerhalb* der einhüllenden Parabel können jedoch durch *zwei* Flugbahnen erreicht werden, nämlich im Flachschuß ($\vartheta_0 < 45°$) und im Steil- oder Bogenschuß ($\vartheta_0 > 45°$). Die Summe der Abgangswinkel ϑ_0 dieser beiden Flugbahnen ergibt 90°.

3.1.3. Schießen auf geneigter Ebene; das Flugbahnschwenken

Wenn die Ziellinie mit der Horizontalen einen Winkel γ bildet, ergibt sich für die Schußweite

$$X_\gamma = \frac{2v_0^2}{g} \cdot \frac{\cos \vartheta_0 \sin (\vartheta_0 - \gamma)}{\cos^2 \gamma} \tag{12}$$

und für die Flugzeit

$$T = \frac{2v_0}{g} \cdot \frac{\sin (\vartheta_0 - \gamma)}{\cos \gamma} . \tag{13}$$

Um das Ziel A zu treffen (Bild 303), muß also die Flugbahn „geschwenkt", d. h. zu dem Geländewinkel γ der Aufsatzwinkel ϑ_1 addiert werden. Den Gesamtwinkel ϑ_0 bezeichnet man als Erhöhung.

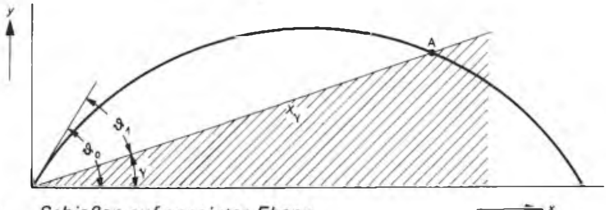


Bild 303. *Schießen auf geneigter Ebene.*

Stellt man bei schiefem (ansteigendem oder abfallendem) Gelände denselben Aufsatzwinkel wie bei waagerechter Ebene ein, so erhält man bei positivem Geländewinkel im allgemeinen Kurzschuß, bei negativem stets Weitschuß. Bei kleinem Geländewinkel γ ist dieser Fehler jedoch gering.

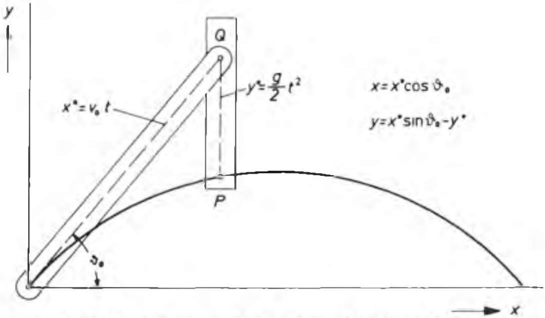


Bild 304. *Flugbahnbestimmung nach dem „Angelrutenprinzip".*

Bei der Flugbahnbestimmung nach dem „Angelrutenprinzip" (Bild 304) wird die Geschoßbahn als die jeweilige Resultierende einer gleichförmigen Bewegung in Richtung der Anfangstangente und einer gleichförmig beschleunigten Vertikalbewegung ermittelt. Legt man Q — P für eine bestimmte Flugzeit t so fest, daß x^* und x den Winkel ϑ_0 bilden, so gibt bei der Mündungsgeschwindigkeit v_0 und der Erhöhung ϑ_0 P die Lage des Geschosses nach t Sekunden an.

Das Schwenken nach dem Angelrutenprinzip, das bei kleinen Erhöhungen und Schwenkwinkeln näherungsweise auch für den lufterfüllten Raum gilt, ist eine bessere Methode als die vorher angegebene des Flugbahnschwenkens: Durch Änderung des Winkels ϑ_0 (Bild 304), der

der Erhöhung ϑ_1 (Bild 303) entspricht, d.h. durch Auf- und Abwärtsschwenken der „Angelrute", kann also jede beliebige Flugbahn ermittelt werden.

3.1.4. Der bestrichene Raum

Unter dem bestrichenen Raum (Bild 305) versteht man jene Strecke ΔX im Zielgebiet, bei der die Flughöhe y kleiner oder gleich der Zielhöhe Δy ist.

Die folgenden Betrachtungen sind wichtig, weil sie bei vorgegebener Zielhöhe Δy einen Anhalt dafür geben, wie genau die Entfernungsmessungen X sein müssen und wie groß die Treffwahrscheinlichkeit ist, für die ΔX ein Maß darstellt.

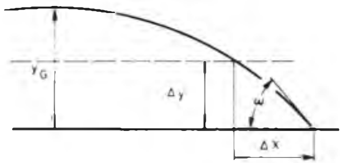


Bild 305. *Zur Berechnung des bestrichenen Raumes.*

Die allgemeine Flugbahn läßt sich recht gut durch Parabelbögen annähern. Das macht man sich für den letzten Teilbogen zunutze: Aus der Flugbahngleichung (9) (luftleerer Raum) erhält man so mit der Geschwindigkeit im Ziel v_E und dem Auftreffwinkel ω die Beziehung

$$\Delta X = \frac{v_E^2}{g} \sin\omega \cos\omega - \sqrt{\frac{v_E^2}{g} \cos^2\omega \left(\frac{v_E^2}{g} \sin^2\omega - 2\Delta y\right)}, \quad (14)$$

die sich unter Verwendung der Gipfelhöhe y_G (Gleichung (10)) erheblich auf

$$\Delta X = 2y_G \cot\omega \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\Delta y}{y_G}}\right) \quad (15)$$

vereinfacht. Für den Fall $\Delta y \ll y_G$, der in der Praxis häufig vorliegt, wird damit

$$\Delta X = \Delta y \cot\omega \left(1 + \frac{\Delta y}{4y_G}\right) \quad (16)$$

oder mit der Schußweite X (Tabelle 301)

$$\Delta X = \Delta y \cot\omega \left(1 + \frac{\Delta y \cot\omega}{X}\right). \quad (17)$$

Diese Gleichungen lassen sich sehr gut auf den lufterfüllten Raum anwenden, wenn man in Gleichung (16) anstelle von $4y_G$ die Größe

$3y_G$ setzt (DUFRÉNOIS) [2]; aus den Gleichungen (16) und (17) werden dann die Gleichungen

$$\Delta X = \Delta y \cot \omega \left(1 + \frac{\Delta y}{3y_G}\right) \tag{18}$$

und

$$\Delta X = \Delta y \cot \omega \left(1 + \frac{4\Delta y \cot \omega}{3X}\right) \tag{19}$$

oder nach Untersuchungen von W. KRAUS [3]

$$\Delta X = \Delta y \cot \omega \left(1 + \frac{3\Delta y \cot \omega}{2X}\right). \tag{20}$$

3.2. Die Geschoßbahn im lufterfüllten Raum

3.2.1. Aerodynamik des Geschosses

Am Geschoß greifen im lufterfüllten Raum neben der Schwerkraft zusätzlich Luftkräfte an, die im Gegensatz zur Schwerkraft Oberflächenkräfte sind. Das Geschoß ist von der atmosphärischen Luft umgeben, die beim Flug an der Geschoßoberfläche entlangströmt. Dabei wird senkrecht auf jedes Oberflächenelement eine Druckkraft ausgeübt; durch das Haften von Luftmolekülen an der Oberfläche infolge der inneren Reibung der Luft entstehen in tangentialer Richtung Reibungskräfte.

3.2.1.1. Der Luftwiderstand

Der Prandtlsche Ansatz für ein Luftwiderstandsgesetz lautet

$$W = c_W \frac{\rho}{2} v^2 \frac{\pi}{4} d^2, \tag{21}$$

wobei

- W der Luftwiderstand (die Widerstandskraft),
- c_W der dimensionslose Widerstandsbeiwert,
- ρ die Luftdichte,
- v die Geschoßgeschwindigkeit,
- d der Geschoßdurchmesser

ist. Den grundsätzlichen Aufbau dieses Gesetzes erkennt man leicht: Der Widerstand W wird der Luftmasse proportional sein, die das Geschoß je Zeiteinheit verdrängen muß, also

$$W \sim \rho v F, \tag{22}$$

wobei F der Geschoßquerschnitt ist.

Da nach der Newtonschen Bewegungsgleichung die Kraft gleich der zeitlichen Änderung des Impulses ist, wird der Widerstand insgesamt dem Produkt „Luftmasse mal Geschwindigkeit" proportional sein. Mit dem Proportionalitätsfaktor c_W erhält man somit Gleichung (21).

Der dimensionslose Widerstandsbeiwert c_W ist keinesfalls konstant, sondern von der Form und Geschwindigkeit des Geschosses und dem Zustand der vom Geschoß zu durchfliegenden Luft abhängig; er ändert sich also längs der Flugbahn.

Aus Betrachtungen mit dimensionslosen Größen, nach denen auch Gleichung (21) abgeleitet werden kann, findet man, daß der Widerstandsbeiwert c_W wieder von dimensionslosen Größen, der Machschen Zahl

$$M = \frac{v}{a} \qquad (23)$$

und der Reynoldsschen Zahl

$$Re = \frac{v\, l_x\, \rho}{\eta} \,, \qquad (24)$$

abhängt (Abschnitt 3.2.1.3); dabei ist

- l_x eine von der Geschoßgeometrie abhängige charakteristische Länge (z.B. der Durchmesser d oder die Länge l),
- a die Schallgeschwindigkeit,
- ρ die Dichte der Luft,
- η die dynamische Zähigkeit der Luft.

Die Machsche Zahl ist ein Maß dafür, wie stark die Trägheitskräfte im Vergleich zu Kräften sind, die durch Kompression der durchflogenen Luft entstehen. Die Reynoldssche Zahl weist auf das Verhältnis der Trägheits- zu den Reibungskräften hin.

Wenn die Tangente an die Bahn eines Geschosses mit dessen Achse zusammenfällt, trifft bei rotationssymmetrischen Körpern nur *eine* Luftkraft auf, die sich aus dem Druck- oder Wellenwiderstand, dem Reibungswiderstand und dem Bodensog zusammensetzt. Dementsprechend spaltet man den Widerstandsbeiwert

$$c_W = c_{wW} + c_{wR} + c_{wB} \qquad (25)$$

formal auf, wobei

- c_{wW} der Beitrag des Wellenwiderstandes zum c_W-Wert,
- c_{wR} der Beitrag des Reibungswiderstandes zum c_W-Wert,
- c_{wB} der Beitrag des Bodensogs zum c_W-Wert

ist. Abschätzungen für diese Beiwerte finden sich u.a. bei I. SZABO [4].

Bei Unterschallgeschwindigkeit ($M < 1$) laufen die Wellen dem Geschoß voraus; es besteht also ein gewisser Druckausgleich. Bei Überschall-

geschwindigkeit ($M > 1$) ist das nicht möglich; es bilden sich Stoßfronten. Der Druck- oder Wellenwiderstand liefert also im Überschallbereich einen wesentlichen Beitrag zum Gesamtwiderstand. Bei Unterschallgeschwindigkeit sind Reibung und Bodensog die Hauptanteile des Widerstandes.

Innerhalb einer sehr dünnen Schicht, der Prandtlschen Grenzschicht, werden die Luftmoleküle mitgenommen; sie erhalten eine größere Geschwindigkeit als diejenigen Moleküle, die vom Geschoß weiter entfernt sind. Nur bei kleinen Reynoldsschen Zahlen Re sind die Stromlinien nahezu parallel zur Wand (laminare Grenzschicht), bei großen Reynoldsschen Zahlen Re bilden sich durch die innere Reibung der Luft innerhalb der Grenzschicht Wirbel (turbulent), die sich am Geschoßboden wieder ablösen und hinter dem Geschoßboden eine Wirbelstraße bilden (v. Kármánsche Wirbelstraße). Sie sind maßgeblich für die Größe des Bodensogs verantwortlich. Bei Unterschallgeschwindigkeit lassen sich durch geeignete Formgebung des Geschosses (Zeppelinform) Wirbelbildungen weitgehend heruntersetzen. Der praktischen Verwirklichung der Zeppelinform stehen aber verschiedene Schwierigkeiten entgegen [5].

Es zeigt sich, daß bei schlanken Spitzgeschossen der Anteil des Bodensogs bis weit in den Überschallbereich hinein bis zur Hälfte des Gesamtwiderstandes betragen kann, während mit zunehmend stumpferen Geschossen der Wellenwiderstand den Reibungswiderstand überwiegt.

Im Normalfall, wo c_W etwa dem Widerstandsbeiwert $c_{W\,I}$ nach dem Rheinmetall-Widerstandsgesetz bzw. dem deutschen Luftwiderstandsgesetz Nr. 2 (Bild 306) entspricht, ergibt sich bei der Machschen Zahl 3 für die einzelnen Beiwerte folgende Verteilung:

$$c_{wW} : c_{wR} : c_{wB} = 0{,}13 : 0{,}05 : 0{,}11 = 45\,\% : 17\,\% : 38\,\%$$

Bild 306 zeigt die Abhängigkeit der c_W-Werte für verschiedene Geschoßformen von der Machschen Zahl M.

Bei der Lösung der Hauptgleichung der äußeren Ballistik (Abschnitt 3.2.2) werden teilweise besondere Widerstandsgesetze verwendet (SIACCI, d'ANTONIO), die z.B. in der speziellen Form

$$W = c_n \frac{\rho}{2} v_0^{\,2-n} v^n \frac{\pi}{4} d^2 \tag{26}$$

(z.B. $n = 1{,}5$ bei d'ANTONIO) die geschlossene Integration der Hauptgleichung ermöglichen. Durch den Faktor $v_0^{\,2-n}$ wird erreicht, daß die Beiwerte c_n dimensionslos bleiben.

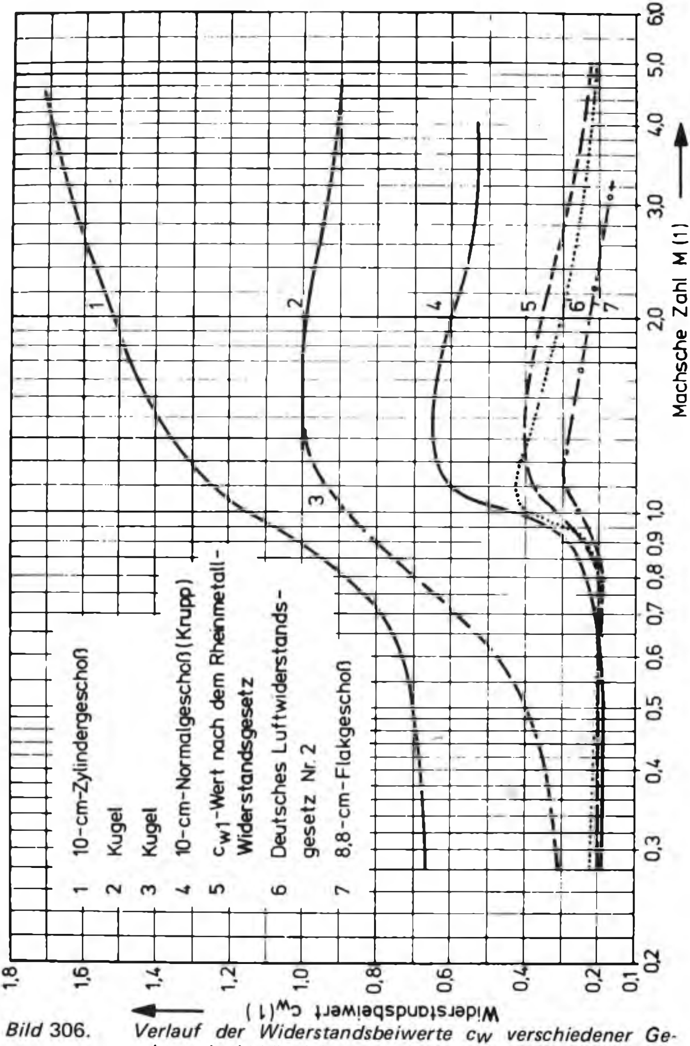


Bild 306. *Verlauf der Widerstandsbeiwerte c_W verschiedener Geschosse in Abhängigkeit von der Machschen Zahl M.*

Zu diesen Fassungen des Widerstandsgesetzes ist auch die Beziehung

$$W = m\,c\,f\,(v) \tag{27}$$

zu zählen, bei der die Abhängigkeit des Luftwiderstandes W von der Geschoßgeschwindigkeit v durch die Funktion f(v) erfaßt wird. Die Größe c bezeichnet man als ballistischen Beiwert.

3.2.1.2. Luftkräfte bei nicht-axialer Anströmung

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 3.2.1.1 gemachten Voraussetzungen bildet die Geschoßachse in Wirklichkeit stets einen Winkel mit der Flugrichtung (Anstellwinkel α, Bild 307). Die bei schiefer Anströmung senkrecht zum Widerstand W wirksame Kraftkomponente nennt man den Auftrieb A. Die Zerlegung der Luftkraft in Richtung der Anströmung (Flugrichtung) und senkrecht dazu, also in Widerstand und Auftrieb, kann auch durch eine solche in Richtung der Geschoßachse und senkrecht dazu ersetzt werden; man erhält so die Tangentialkraft T und die Normalkraft N. Da nun der Luftangriffspunkt D im allgemeinen nicht mit dem Schwerpunkt S zusammenfällt, erhält man zusätzlich ein Drehmoment um den Schwerpunkt, das Drehmoment der Luftkraft M_L. In Analogie zum Prandtlschen Ansatz (Gleichung (21)) setzt man mit den entsprechenden Beiwerten $c_{(...)}$:

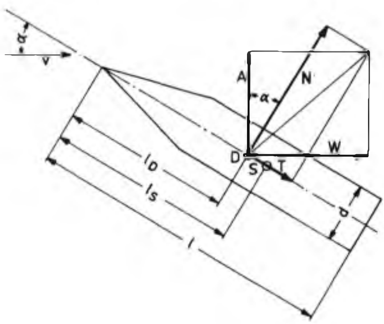


Bild 307. *Am Geschoß wirkende Luftkräfte;*
v = Anströmgeschwindigkeit, α = Anströmwinkel (Anstellwinkel), D = Luftangriffspunkt, S = Schwerpunkt, d = Geschoßdurchmesser, l = Geschoßlänge, l_S = Abstand des Schwerpunktes von der Geschoßspitze, l_D = Abstand des Luftangriffspunktes von der Geschoßspitze.

$$W = c_w \frac{\rho}{2} v^2 \frac{\pi}{4} d^2, \qquad \text{Widerstand}, \qquad (21)$$

$$A = c_a \frac{\rho}{2} v^2 \frac{\pi}{4} d^2, \qquad \text{Auftrieb}, \qquad (28)$$

$$T = c_t \frac{\rho}{2} v^2 \frac{\pi}{4} d^2, \qquad \text{Tangentialkraft}, \qquad (29)$$

$$N = c_n \frac{\rho}{2} v^2 \frac{\pi}{4} d^2, \qquad \text{Normalkraft}, \qquad (30)$$

$$M_L = c_m \frac{\rho}{2} v^2 \frac{\pi}{4} d^3, \qquad \text{Drehmoment der Luftkraft}. \qquad (31)$$

Aus Symmetriegründen müssen c_w und c_t gerade Funktionen, c_a, c_n und c_m ungerade Funktionen des Anströmwinkels α sein. Für kleine Anströmwinkel α erhält man also durch Reihenentwicklung die Beziehungen

$$c_w = (c_w)_0, \qquad (32)$$

$$c_t = (c_t)_0, \qquad (33)$$

$$c_a = \left(\frac{dc_a}{d\alpha}\right)_0 \alpha, \qquad (34)$$

$$c_n = \left(\frac{dc_n}{d\alpha}\right)_0 \alpha, \qquad (35)$$

$$c_m = \left(\frac{dc_m}{d\alpha}\right)_0 \alpha; \qquad (36)$$

dabei beziehen sich die mit dem Index 0 versehenen Größen auf den Anstellwinkel $\alpha = 0$.

Zur Vereinfachung werden die Bezeichnungen

$$c_a^* \equiv \left(\frac{dc_a}{d\alpha}\right)_0, \qquad (37)$$

$$c_n^* \equiv \left(\frac{dc_n}{d\alpha}\right)_0 \qquad (38)$$

und

$$c_m^* \equiv \left(\frac{dc_m}{d\alpha}\right)_0 \qquad (39)$$

eingeführt[1]), für die aufgrund geometrischer Beziehungen (Bild 307) in gleicher Näherung die Gleichungen

1) Unter * ist also die jeweilige Ableitung nach α an der Stelle $\alpha = 0$ zu verstehen.

$$c_t = c_w, \qquad (40)$$

$$c_n^* = c_a^* + c_w \qquad (41)$$

und $$c_m^* = c_n^* \frac{l_D - l_S}{d} \qquad (42)$$

gelten.

Überdies treten infolge des Dralls und der Geschoßpendelung folgende Kräfte und Momente auf:

$$K = c_k \frac{\rho}{2} v\omega \frac{\pi}{4} d^3, \quad \text{Magnuskraft,} \qquad (43)$$

$$E = c_e \frac{\rho}{2} v \dot{\alpha} \frac{\pi}{4} d^3, \quad \text{Dämpfungskraft,} \qquad (44)$$

$$I = c_i \frac{\rho}{2} v\omega \frac{\pi}{4} d^4, \quad \text{Rollbremsmoment,} \qquad (45)$$

$$J = c_j \frac{\rho}{2} v\omega \frac{\pi}{4} d^4, \quad \text{Magnusmoment,} \qquad (46)$$

$$H = c_h \frac{\rho}{2} v\dot{\alpha} \frac{\pi}{4} d^4, \quad \text{Dämpfungsmoment,} \qquad (47)$$

wobei ω die Winkelgeschwindigkeit des Geschosses und $\dot{\alpha}$ die zeitliche Ableitung des Anstellwinkels α ist.

R. E. KUTTERER [5] führt die Widerstandsbeiwerte $c_{(...)}$ aus praktischen Gründen als

$$c_{(...)}^{(\mathrm{Kutterer})} = c_{(...)} \frac{\pi}{8} \qquad (48)$$

ein, so daß z.B. Gleichung (43) die für numerische Rechnungen handlichere Form

$$K = c_k^{(\mathrm{Kutterer})} \rho\, v\, \omega\, d^3 \qquad (49)$$

annimmt.

Die Beiwerte c_k und c_j sind ungerade Funktionen des Anströmwinkels α, so daß sich wie oben die Beziehungen

$$c_k = \left(\frac{dc_k}{d\alpha}\right)_0 \alpha \qquad (50)$$

und $$c_j = \left(\frac{dc_j}{d\alpha}\right)_0 \alpha \qquad (51)$$

angeben lassen.

Man definiert entsprechend den Gleichungen (37) bis (39)

$$c_k^* \equiv \left(\frac{dc_k}{d\alpha}\right)_0 \tag{52}$$

$$c_j^* \equiv \left(\frac{dc_j}{d\alpha}\right)_0 \tag{53}$$

und $$M_L^* \equiv \left(\frac{dM_L}{d\alpha}\right)_0. \quad \text{(Abschn. 3.2.3.3)} \tag{54}$$

Wenn l_K der Abstand des Angriffspunktes der Magnuskraft von der Geschoßspitze ist, gilt ferner

$$c_j^* = c_k^* \, (l_K - l_S)/d. \tag{55}$$

Um eine Vorstellung von der Größenordnung der aerodynamischen Beiwerte zu erhalten, sollen diese als Beispiel für ein 20-mm-Geschoß (Bild 308) angegeben werden [5].

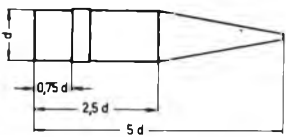


Bild 308. *20-mm-Geschoß (schematisch).*

$\frac{l}{d} = 5$ Geschoßmasse m = 0,1149 kg

$\frac{l_S}{d} = 2{,}81$ $\frac{D}{d} = 26{,}5$ (D = Drallänge = Ganghöhe der Züge)

Mit diesen Abmessungen ergeben sich bei der Machschen Zahl M = 1,54 folgende aerodynamische Beiwerte:

$c_w = 0{,}40$	$c_j^* = 0{,}84$
$c_a^* = 2{,}35$	$\frac{l_D}{d} = 2{,}09$[1]
$c_n^* = 2{,}75$	$\frac{l_K}{d} = 3{,}7$[1]
$c_m^* = 1{,}87$	
$c_k^* = 0{,}94$	$c_e \approx 5{,}1$
$c_h = 20$	$c_i \approx 3 \cdot 10^{-3}$ bis $8 \cdot 10^{-3}$

1) Vgl. Abschnitt 3.2.3.5.2.

3.2.1.3. Ähnlichkeits- und Modellgesetze

Wenn man bei der Bestimmung der aerodynamischen Beiwerte gezwungen ist, ein Modell in einem anderen Maßstab als dem des Originals auszuführen, so hat die geometrische Ähnlichkeit der Körper nicht ohne weiteres die Ähnlichkeit der Strömungsvorgänge um das Geschoß zur Folge. Es müssen vielmehr gewisse Ähnlichkeitsgesetze zwischen Modell und Original erfüllt sein:

(1) Wenn die geometrische Ähnlichkeit erfüllt ist, das Verhältnis homologer Stücke

$$l/l' = \lambda \tag{56}$$

also konstant ist, müssen außerdem die Bedingungen

(2) $$Re = \frac{\rho\, v\, l}{\eta} = \frac{\rho'\, v'\, l'}{\eta'} \tag{57}$$

und

(3) $$M = \frac{v}{a} = \frac{v'}{a'} \tag{58}$$

eingehalten werden, wobei η die dynamische Zähigkeit und a die Schallgeschwindigkeit des entsprechenden Gases ist. Dabei gilt der Index ' für das Modell. Die Größe λ bezeichnet das Maßstabsverhältnis.

Die ähnliche Geometrie sollte auch möglichst ähnliche Oberflächenbeschaffenheit umfassen, um ähnliches Grenzschichtverhalten zu erzielen.

Bei Erfüllung der Ähnlichkeitsgesetze (56) bis (58) zwischen Modell und Original sind die aerodynamischen Beiwerte des Modells und des Originals gleich, solange man unterhalb des Hyperschallbereiches $M = 5$ bleibt. Für $M < 0{,}5$ gelten in guter Näherung die Gesetze der inkompressiblen Strömung, so daß Bedingung (58) vernachlässigt werden kann (Abschnitt 3.2.1.1).

Bei sehr großen Reynoldsschen Zahlen Re muß meist nur die Bedingung (58) erfüllt sein. Damit ähnliche Grenzschichten vorliegen, dürfen jedoch Re und Re' beide nicht bei $Re_l \approx 10^6$ [1]) liegen, da in diesem Bereich die Grenzschicht von laminar in turbulent umschlägt. Für ebene Platten und schlanke Rotationskörper gilt für den Reibungswert bei laminarer Strömung

$$c_{f\,(laminar)} = 1{,}328\, Re_l^{-1/2} \tag{59}$$

und bei turbulenter Strömung

$$c_{f(turbulent)} = 0{,}074\, Re_l^{-1/5}, \tag{60}$$

1) bezogen auf die Geschoßlänge l.

entsprechend Grenzschichtdicken von

$$\delta_{(laminar)} = 5\ Re_l^{-1/2}\ l \tag{61}$$

und

$$\delta_{(turbulent)} = 0{,}38\ Re_l^{-1/5}\ l. \tag{62}$$

Von dem Grenzschichtverhalten hängen vornehmlich jene Beiwerte ab, die vorwiegend auf Reibungsvorgängen beruhen, wie z.B. die Magnuskraft. Bei der Übertragung vom Modell auf das Original ergibt sich dann für diese Beiwerte bei z.B. turbulenter Strömung mit $Re > 10^6$ mit den Gleichungen (57) und (60)

$$c_{(...)} = c'_{(...)} \left(\frac{d}{d'}\right)^{-1/5}. \tag{63}$$

3.2.1.4. Die Atmosphäre

Die im Verhältnis zum Erdradius (6 378 km am Äquator) recht niedrige Troposphäre und die sich daran anschließenden untersten Schichten der Stratosphäre sind etwa die Höhenlagen, in denen sich das artilleristische Schießen in der Hauptsache abspielt.

Die Normalwerte für die Lufthülle sind in der seit 1952 von der internationalen zivilen Luftfahrt eingeführten und für die meisten Schußtafeln verwendeten ICAO-Standard-Atmosphäre[1)] festgelegt.

In Tabelle 302 sind die festgelegten Werte für Temperatur, Druck, Dichte und Schallgeschwindigkeit bei trockener Luft in Abhängigkeit von der Höhe zusammengestellt, in Bild 309 sind sie bis zu einer Höhe von 20 km dargestellt.

Tabelle 302. *Temperatur, Luftdruck, Luftdichte und Schallgeschwindigkeit der ICAO-Standard-Atmosphäre.*

Höhe H[2)] km.	Schichtung	Temperatur T K	Druck p mbar	Dichte ρ kg/m³	Schallgeschwindigkeit a m/s
0	NN	288,16	1013,25	1,225	340,429
0 - 11	Troposphäre	T_0-0,0065H	$p_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{5,2561}$	$\rho_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{4,2561}$	$a_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}$
11	Tropopause	216,66	226,32	0,364	295,188
11-65	Stratosphäre	216,66	$p_1 \cdot 10^{\frac{H_1 - H}{14602}}$	$\rho_1 \frac{p}{p_1}$	295,188
		(H und H_1 in m)			

Der Index 0 gibt die Werte für die Höhe 0 (Meereshöhe), der Index 1 die Werte für die Höhe 11 km (Tropopause) an.

---

1) International Civil Aviation Organisation.

2) Genaugenommen handelt es sich hierbei um die geopotentielle Höhe. Einer geometrischen Höhe von 100 km entspricht eine geopotentielle von 98,454 km [1].

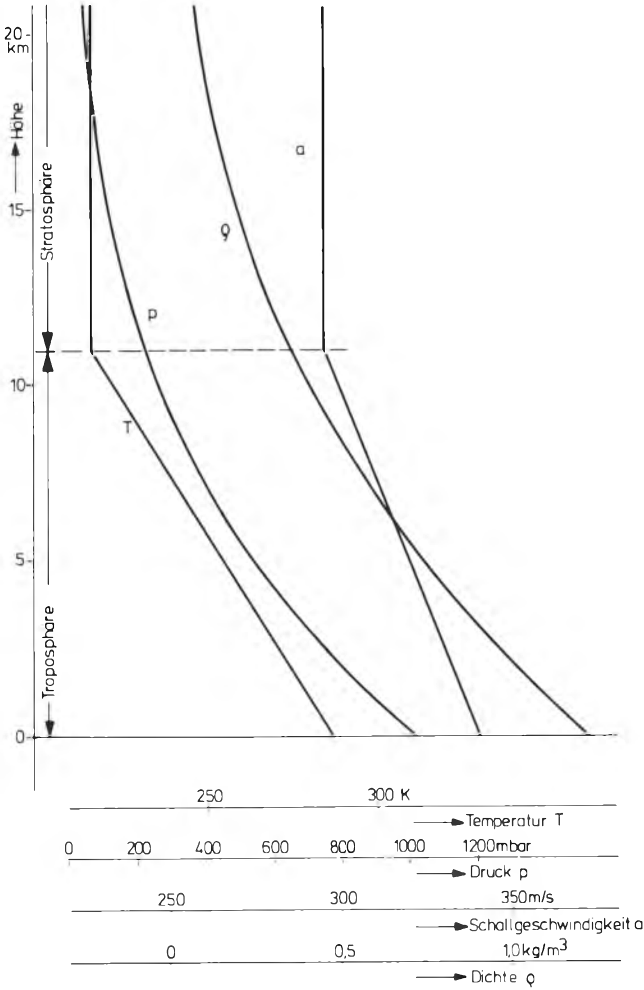


Bild 309. *ICAO-Standard-Atmosphäre.*

3.2.2. Flugbahnberechnungen

3.2.2.1. Die Hauptgleichung der äußeren Ballistik

Zur Ableitung der Hauptgleichung geht man wieder von der Newtonschen Bewegungsgleichung aus. Auf das Geschoß wirken nach Verlassen der Mündung als äußere Kräfte die Schwerkraft mg und der Luftwiderstand W (Bild 310). Zur Beschreibung des Luftwiderstandes, der nur in Richtung der Bahntangente wirksam sein soll, geht man von der Beziehung (27) aus.

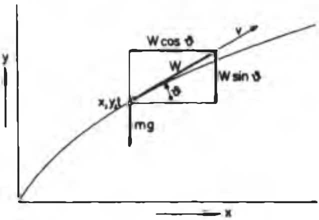


Bild 310. *Flugbahnelemente.*

Die Bewegungsgleichung liefert dann für die x-Richtung

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = - W \cos \vartheta \qquad (64)$$

und für die y-Richtung

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = - W \sin \vartheta - mg, \qquad (65)$$

woraus sich durch Substitution von W nach Gleichung (27) mit

$$\frac{dx}{dt} = v \cos \vartheta \qquad (66)$$

und $$\frac{dy}{dt} = v \sin \vartheta \qquad (67)$$

die Gleichungen

$$d(v \cos \vartheta) = - c\, f(v) \cos \vartheta\, dt \qquad (68)$$

und $$d(v \sin \vartheta) = - c\, f(v) \sin \vartheta\, dt - g\, dt \qquad (69)$$

ergeben, welche Beziehungen zwischen v, ϑ und t darstellen.

Substitution von dt mit Gleichung (68) in Gleichung (69) führt auf

$$\boxed{g\, d(v \cos \vartheta) = c\, v\, f(v)\, d\, \vartheta.} \qquad (70)$$

Diese Gleichung wird als Hauptgleichung der äußeren Ballistik bezeichnet. Sie enthält bei konstantem c nur die Variablen v und ϑ.

Aus den Gleichungen (66) bis (68) und (70) ergeben sich für die Bahnkoordinaten x und y sowie die Zeit t die Beziehungen

$$dx = -\frac{v^2}{g}\, d\,\vartheta, \tag{71}$$

$$dy = -\frac{v^2}{g} \tan\vartheta\, d\,\vartheta \tag{72}$$

und

$$dt = -\frac{v}{g\cos\vartheta}\, d\,\vartheta, \tag{73}$$

die sich integrieren lassen, da nach Gleichung (70) die Bahngeschwindigkeit v als Funktion der Winkelkoordinate ϑ bekannt ist.

Nach Gleichung (21) ist der Luftwiderstand W dem Geschoßquerschnitt $\frac{\pi}{4} d^2$ proportional; danach und nach der Bewegungsgleichung (64) ist die Geschoßbeschleunigung d^2x/dt^2 der auf die Flächeneinheit bezogenen Masse, der Querschnittsbelastung,

$$Q = \frac{m}{\frac{\pi}{4} d^2} \tag{74}$$

umgekehrt proportional. Bei ähnlichen Geschossen ist die Querschnittsbelastung nach Gleichung (74) im allgemeinen dem Kaliber proportional.

3.2.2.2. Die Integration der Hauptgleichung

Die geschlossene Integration der Hauptgleichung ist entweder nur unter gewissen vereinfachenden Annahmen oder unter Zugrundelegung eines speziellen analytischen Ausdrucks für den Luftwiderstand (Abschnitt 3.2.1.1) möglich.

Die allgemeine Integration ist nach Näherungsverfahren [1], [5], [7], [8] (z.B. nach RUNGE-KUTTA [9]) mit elektronischen Rechenanlagen durchzuführen, die das Differentialgleichungssystem (70) bis (73) in kurzer Zeit lösen.

3.2.2.2.1. Flugbahnberechnung mit konstantem Widerstandsbeiwert c_W

Für kleine Geschwindigkeitsbereiche und damit kurze Flugstrecken ist die Annahme

$$c_W = \text{const.} \tag{75}$$

zulässig. Für kurze Flugstrecken ist außerdem der Einfluß der Gravitation, also das Wegkrümmen der Flugbahn [1], gering. Überdies ist im allgemeinen, besonders für kleinkalibrige Geschosse (Gleichung (74)), die Verzögerung durch den Luftwiderstand erheblich größer als die Beschleunigung durch die Erdanziehung, also $W/m \gg g$. Unter diesen Voraussetzungen läßt sich aus der Hauptgleichung (70) mit der Anfangsbedingung (x = 0)

$$v = v_0 \tag{76}$$

für die Bahngeschwindigkeit v die Beziehung

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{c_W \rho\, \pi\, d^2}{8\, m} s\right) \tag{77}$$

ableiten, wobei s die Bogenlänge der fast geraden Flugbahn ist.
Gleichung (77) läßt sich auch direkt aus der Newtonschen Bewegungsgleichung ableiten:

$$m\ddot{s} = -W, \tag{78}$$

wobei sich der in Flugrichtung wirkende Luftwiderstand W nach dem Prandtlschen Ansatz (21) berechnen läßt:

$$m\ddot{s} = -c_W \frac{\rho}{2} \dot{s}^2 \frac{\pi}{4} d^2. \tag{79}$$

Als Lösung dieser Differentialgleichung erhält man mit der Anfangsbedingung (76) wieder die Beziehung (77). Sie ist zur Ermittlung des Geschwindigkeitsabfalls

$$\Delta v = v - v_0 \tag{80}$$

über kurze Entfernungen nützlich; insbesondere vereinfacht sie sich für sehr kurze Entfernungen Δs (Reihenentwicklung!) auf

$$\Delta v = -\frac{c_W \rho\, \pi\, d^2}{8\, m} v_0\, \Delta s. \tag{81}$$

Gleichung (81) wird zur Berechnung des v_0-Zuschlags verwendet.

3.2.2.2.2. **Flugbahnberechnung nach SIACCI**

Dieser Flugbahnberechnung liegt das von F. SIACCI [10] aufgestellte Luftwiderstandsgesetz

$$W = m\, c_S\, f_S(v) \tag{82}$$

mit dem ballistischen Beiwert

$$c_S = \frac{1000}{1{,}206} \frac{i d^2 \rho}{m} \quad \left(\frac{1}{m}\right) \tag{83}$$

zugrunde, wobei der Geschoßdurchmesser d in m und die Dichte ρ in kg/m^3 einzusetzen ist; i ist ein den Luftwiderstand des Geschosses betreffender Formfaktor.

Für die Funktion $f_S(v)$ gibt SIACCI den analytischen Ausdruck

$$f_S(v) = 0{,}2002\, v - 48{,}05 + \sqrt{(0{,}1648 v - 47{,}95)^2 + 9{,}6} + \frac{0{,}0442 v (v-300)}{371 + (v/200)^{10}} \quad \left(\frac{m^2}{s^2}\right) \tag{84}$$

an [10], in dem die Geschwindigkeit v in m/s einzusetzen ist. Das Verfahren ist auf kleinere und mittlere Abgangswinkel beschränkt ($\vartheta_0 < 45°$), da es nur für diesen Bereich gute Näherungswerte liefert. Zur Lösung der Hauptgleichung der äußeren Ballistik mit dem Luftwiderstandsgesetz (82) bis (84) werden Näherungsannahmen getroffen, die durch einen Ausgleichsfaktor β berücksichtigt werden, wobei im allgemeinen

$$c' = \frac{1}{c_S \beta} \tag{85}$$

eingeführt wird. Für kleine Abgangswinkel ist $\beta \approx 1$.

Wenn drei der fünf Größen v_0, ϑ_0, c_S, X und T bekannt sind, ermöglichen von FASELLA aufgestellte Tafeln die beiden übrigen zu bestimmen. Bild 311 zeigt eine graphische Darstellung dieser Tafeln. Es gelten die Beziehungen

$$f_0 = \frac{X}{c'}, \tag{86}$$

$$f_1 = \frac{\sin 2\vartheta_0}{X}, \tag{87}$$

$$f_3 = \frac{T \cos \vartheta_0}{c'}. \tag{88}$$

Aus dem Diagramm ergeben sich die Größen

$$f_1 = f_1\,(v_0, f_0), \qquad (89)$$

$$f_3 = f_3\,(v_0, f_0). \qquad (90)$$

Aus der zusätzlichen Kurvenschar

$$f_V(v_0, f_0) = \frac{\Delta X}{X}\,\frac{v_0}{\Delta v_0} \qquad (91)$$

läßt sich die Schußweitenänderung ΔX in Abhängigkeit von der Änderung der Mündungsgeschwindigkeit Δv_0 bestimmen.

Das Diagramm soll anhand eines Beispiels veranschaulicht werden:

Gegeben: $\frac{1}{c'} = 0{,}5\,\frac{1}{m}$; $v_0 = 800\,\frac{m}{s}$; $X = 4000$ m;

zusätzlich: $\frac{\Delta v_0}{v_0} = 1\,\%$.

Man findet

$$f_0 = 0{,}5 \cdot 4000 = 2000, \qquad (86')$$

$$f_1 = 0{,}000025\,\frac{1}{m} \text{ (aus dem Diagramm)}, \qquad (89')$$

$$\sin 2\,\vartheta_0 = 4000 \cdot 0{,}000025 = 0{,}1, \qquad (87')$$

$$\vartheta_0' = 2{,}87^\circ,$$

$$f_3 \approx 3{,}6\,\frac{s}{m} \text{ (aus dem Diagramm)}, \qquad (90')$$

$$T = \frac{3{,}6}{0{,}5 \cdot \cos 2{,}87^0} = \frac{3{,}6}{0{,}5 \cdot 0{,}9987} = 7{,}2 \text{ s}. \qquad (88')$$

Bei einer v_0-Änderung von 1 % erhält man

$$f_V = 1{,}40 \text{ (aus dem Diagramm)} \qquad (91')$$

und $\Delta X = 4000 \cdot 0{,}01 \cdot 1{,}40 = 56$ m. (91')

3.2.2.2.3. Flugbahnberechnung nach d'ANTONIO (Machsche Zahl $M > 1{,}5$)

Aus der ballistischen Hauptgleichung (70) und der Beziehung (71) läßt sich für rasante Bahnen die Flugbahn nach d'ANTONIO bestimmen. Rasante Bahnen ergeben sich bei Direktbeschuß mit hoher Bahngeschwindigkeit v; der Winkel zwischen Visierlinie und Seelenachse ist also klein. Für diesen Fall fast gerader Flugbahnen läßt sich wegen der kurzen Flugzeiten der Einfluß der Erdanziehung ebenfalls vernachlässigen (s. 3.2.2.2.1), so daß sich die Geschoßbahn allein durch die Bahnkoordinate s beschreiben läßt (eindimensionale Abhängigkeit).

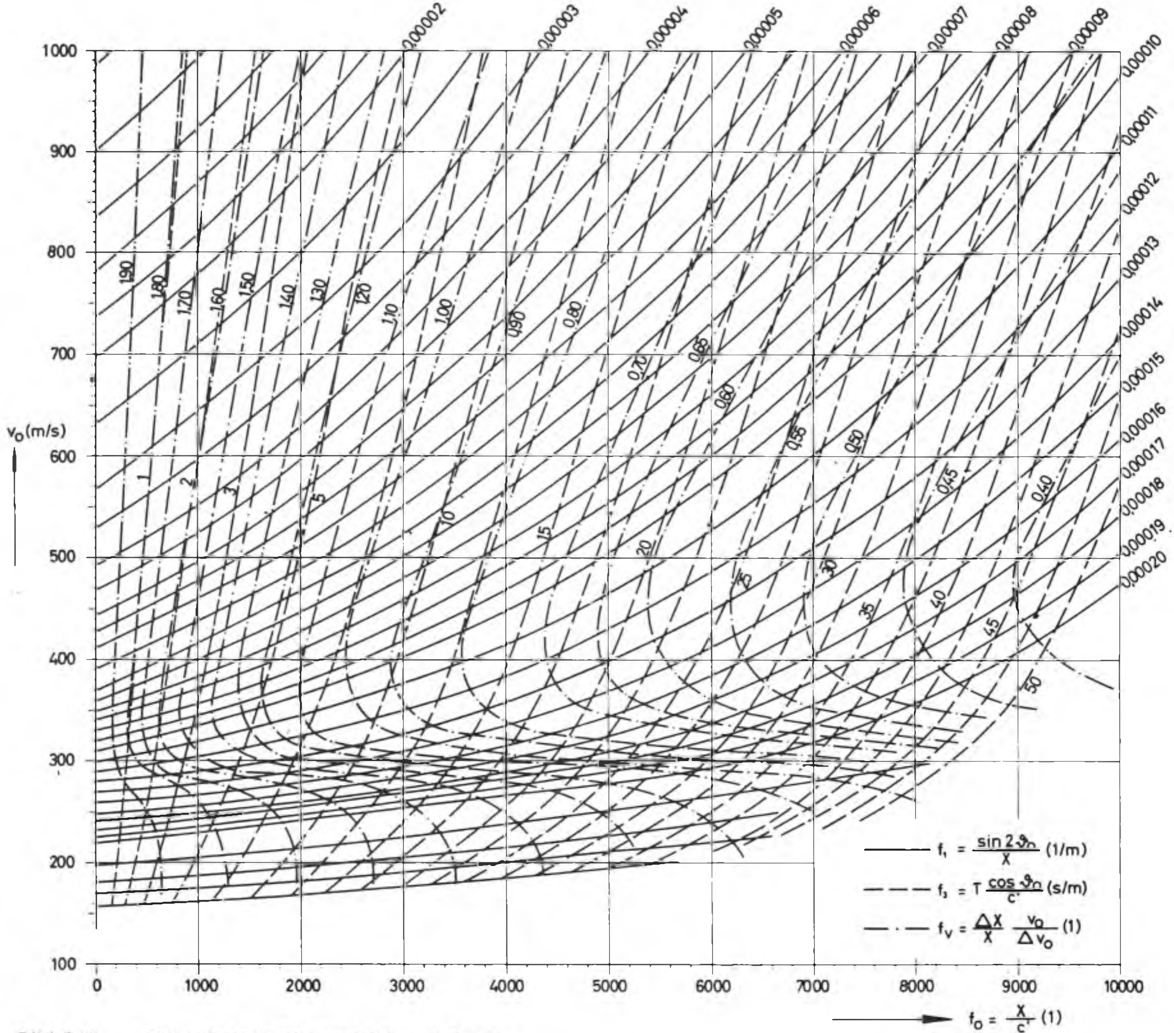


Bild 311. *Ballistische Funktionstafel nach Fasella.*

Mit dieser Näherung wird

$$\cos\vartheta = \text{const.}, \qquad (92)$$

also

$$dx = \cos\vartheta\, ds, \qquad (93)$$

womit sich aus den Gleichungen (66) und (68) die Beziehung

$$dv = -c\, f(v)\, \frac{ds}{v} \qquad (94)$$

ergibt; das führt mit der speziellen Annahme des Widerstandsgesetzes (26) mit n = 3/2 bei d'ANTONIO mit Gleichung (27) auf

$$dv = -c_{3/2} \frac{\rho}{2m} v_0^{1/2}\; v^{3/2}\; \frac{\pi}{4} d^2\, \frac{ds}{v} \qquad (95)$$

oder nach Division durch dt mit

$$v = \frac{ds}{dt} \qquad (96)$$

auf

$$\frac{dv}{dt} = -c_{3/2} \frac{\rho}{2m} v_0^{1/2} v^{3/2}\, \frac{\pi}{4} d^2. \qquad (97)$$

Wenn man die Verzögerung des Geschosses dv/dt durch den Luftwiderstand nach Gleichung (97) wegen der geraden Geschoßbahn wie in Abschnitt 3.2.2.2.1 nun auch direkt aus der Newtonschen Bewegungsgleichung ableitet, erhält man die Beziehung (79). Führt man in dieser Gleichung für den Widerstandsbeiwert die Beziehung

$$c_w = c_{wo} \sqrt{v_o/v} \qquad (98)$$

ein, so erhält man andererseits, da nach Gleichung (96)

$$\frac{dv}{dt} = \ddot{s} \qquad (99)$$

ist, für die Geschoßverzögerung die Beziehung

$$\frac{dv}{dt} = -c_{wo} \frac{\rho}{2m} v_o^{1/2}\; v^{3/2}\; \frac{\pi}{4} d^2. \qquad (100)$$

Ein Vergleich von Gleichung (97) mit Gleichung (100) ergibt, daß

$$c_{3/2} = c_{wo} \qquad (101)$$

gilt.

Gleichung (97) läßt sich direkt integrieren: Mit der Definition

$$a = \frac{c_{3/2}\, \rho\, \pi\, d^2}{16\, m} \qquad (102)$$

wird aus Gleichung (97)

$$\frac{dv}{dt} = -2a\, v_0^{1/2}\, v^{3/2}. \tag{103}$$

Einmalige Integration führt mit der Anfangsbedingung (t = 0)

$$v = v_0 \tag{104}$$

auf

$$\frac{v_0}{v} = (1 + a\, v_0\, t)^2; \tag{105}$$

daraus erhält man mit Beziehung (96) die Abhängigkeit des Geschoßweges s von der Zeit t, die mit der Anfangsbedingung (t = 0)

$$s = 0 \tag{106}$$

die Form

$$(1 - a\, s) = \frac{1}{1 + a\, v_0\, t} \tag{107}$$

hat oder nach Umformung

$$s = \frac{v_0 t}{1 + a\, v_0\, t} \tag{108}$$

bzw.

$$t = \frac{s}{v_0} \cdot \frac{1}{1 - a\, s}. \tag{109}$$

Durch Kombination der Beziehungen (105) und (107) erhält man die Abhängigkeit der Geschoßgeschwindigkeit v vom Geschoßweg s

$$v = v_0\, (1 - a\, s)^2. \tag{110}$$

Weitere nützliche Beziehungen finden sich in Tabelle 301.

Die angegebenen Beziehungen sind im allgemeinen für den Geschwindigkeitsbereich $M > 1{,}5$ gültig, da der Widerstandsbeiwert c_W dann genügend außerhalb des kritischen Bereiches $M \approx 1$ liegt. H. MOLITZ [1] weist darauf hin, daß die Annäherung $n = 3/2$ beim Widerstandsgesetz (26) einen größeren Geschwindigkeitsbereich überdeckt, da man im Überschallbereich die c_W-Kurve oft in einem ziemlich weiten Intervall durch eine Kurve

$$c_W = c_1 \sqrt{\frac{v_0}{v}} \qquad (c_1 = \text{const.}) \tag{111}$$

annähern kann, was aber gerade der Beziehung (98) entspricht.

Wenn man sich auf ganzzahlige Exponenten beschränkt, gibt im Unterschallbereich das quadratische Widerstandsgesetz, im Überschallbereich dagegen das lineare Gesetz die bessere Annäherung an die Wirklichkeit.

3.2.2.2.4. Maximale Schußweiten bei bekannter Querschnittsbelastung und Mündungsgeschwindigkeit

Mit Hilfe der Bilder 312 und 313 läßt sich die maximale Schußweite X_m für den lufterfüllten Raum bestimmen. Mit der Geschoßmasse m und dem Geschoßdurchmesser d kann im Nomogramm Bild 312 die Querschnittsbelastung Q abgelesen werden (Gleichung (74)). Dem Diagramm Bild 313 entnimmt man dann bei gegebener Querschnittsbelastung Q und vorgegebener Mündungsgeschwindigkeit v_0 die maximale Schußweite X_m für den lufterfüllten Raum. Außerdem kann man

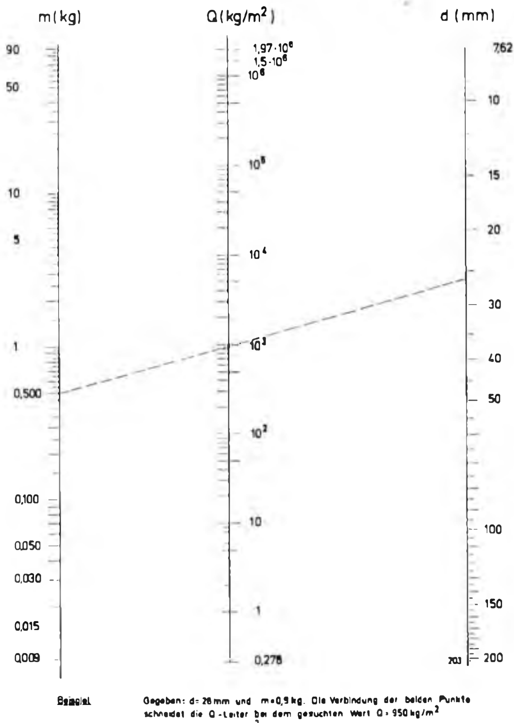


Bild 312. *Nomogramm zur Ermittlung der Querschnittsbelastung Q aus der Geschoßmasse m und dem Geschoßdurchmesser d.*

darin den Abgangswinkel ϑ_0 und die Flugzeit T, die X_m zugeordnet sind, ablesen. Der Darstellung liegen die c_{w1}-Werte nach dem Rheinmetall-Widerstandsgesetz (Bild 306) zugrunde.

Der Korrekturfaktor i (Bild 313) berücksichtigt das abweichende Verhalten der verschiedenen Geschoßformen von diesem Widerstandsgesetz (Abschnitt 3.2.2.2.2).

3.2.2.3. Näherungslösungen

3.2.2.3.1. Bestimmung von Flugbahnparametern aus dem Schußweitenverhältnis

Nach Tabelle 301 ergibt sich das Schußweitenverhältnis

$$\lambda = \frac{X}{X_m} \qquad (112)$$

für den luftleeren Raum aus der Schußweite $X(\vartheta_0)$ bei beliebigem Abgangswinkel ϑ_0 zu der maximalen Schußweite X_m bei $\vartheta_0 = 45^\circ$ bei gleicher Mündungsgeschwindigkeit v_0 zu

$$\lambda = \sin 2\,\vartheta_0. \qquad (113)$$

Diese Beziehung ist für kleine Mündungsgeschwindigkeiten v_0 und sehr große Querschnittsbelastungen Q (Gleichung (74)) näherungsweise auch im lufterfüllten Raum gültig; sie ist in Bild 314 als strichpunktierte Kurve dargestellt.

Wenn der Abgangswinkel ϑ_0 bekannt ist, kann man mit der maximalen Schußweite X_m nach Abschnitt 3.2.2.2.4 (Bild 313) und nach Gleichung (112) aus dieser strichpunktierten Kurve also die Schußweite X und umgekehrt bei bekannter Schußweite den Abgangswinkel näherungsweise bestimmen.

Die übrigen drei Kurven, die für die Kaliber 20 mm, 105 mm und 155 mm im lufterfüllten Raum gelten, zeigen das exakte Schußweitenverhältnis, wobei die maximale Schußweite X_m wieder Bild 313 entnommen ist; die Schußweiten X in Abhängigkeit vom Abgangswinkel ϑ_0 entstammen der Schußtafel (experimentell). Die größten Abweichungen gegenüber dem luftleeren Raum treten nach Voraussetzung beim Kaliber 20 mm auf.

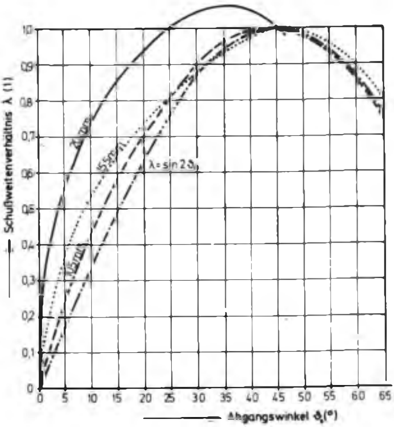


Bild 314. *Schußweitenverhältnis* λ *in Abhängigkeit vom Abgangswinkel* ϑ_O.

3.2.2.3.2. Angenäherte zeichnerische Flugbahndarstellung (nach R. SCHMIDT)

Wenn die meßbaren Größen Abgangswinkel ϑ_O, Schußweite X und Flugzeit T bekannt sind, läßt sich nach R. SCHMIDT [2], [11], [12] die Flugbahn in guter Näherung leicht konstruieren (Bild 315). Dem Verfahren liegt die Hauptsche Gleichung (10) zugrunde, die die Gipfelhöhe y_G mit der Flugzeit T verbindet und die Form

$$y_G = 1{,}23\ T^2 \tag{114}$$

annimmt, wenn man y_G in Meter und T in Sekunden angibt. Bei der punktweisen Konstruktion des Bahnverlaufs macht man weiterhin von der Eigenschaft einer Parabel Gebrauch, daß die Verbindungslinie zweier Tangentenmitten (Tangentenlänge = Abstand Pol-Berührungspunkt) wieder eine Tangente ist.

Die im Abstand y_G zu AZ gezogene Parallele schneidet den freien Schenkel des in A an AZ angetragenen Winkels ϑ_O in B. Verdoppelt man AB über B hinaus, so erhält man C. Die Verbindung CZ schneidet die Parallele zu AZ in D. D ist die Mitte von CZ; G ist die Mitte von BD. Verbindet man die Mitte von AB (Punkt F) mit der Mitte von BG (Punkt E), so erhält man eine Tangente an die Flugbahn, die diese in G_1 (Mitte von FE) berührt. Die Punkte G, G_1, . . . sind Punkte der

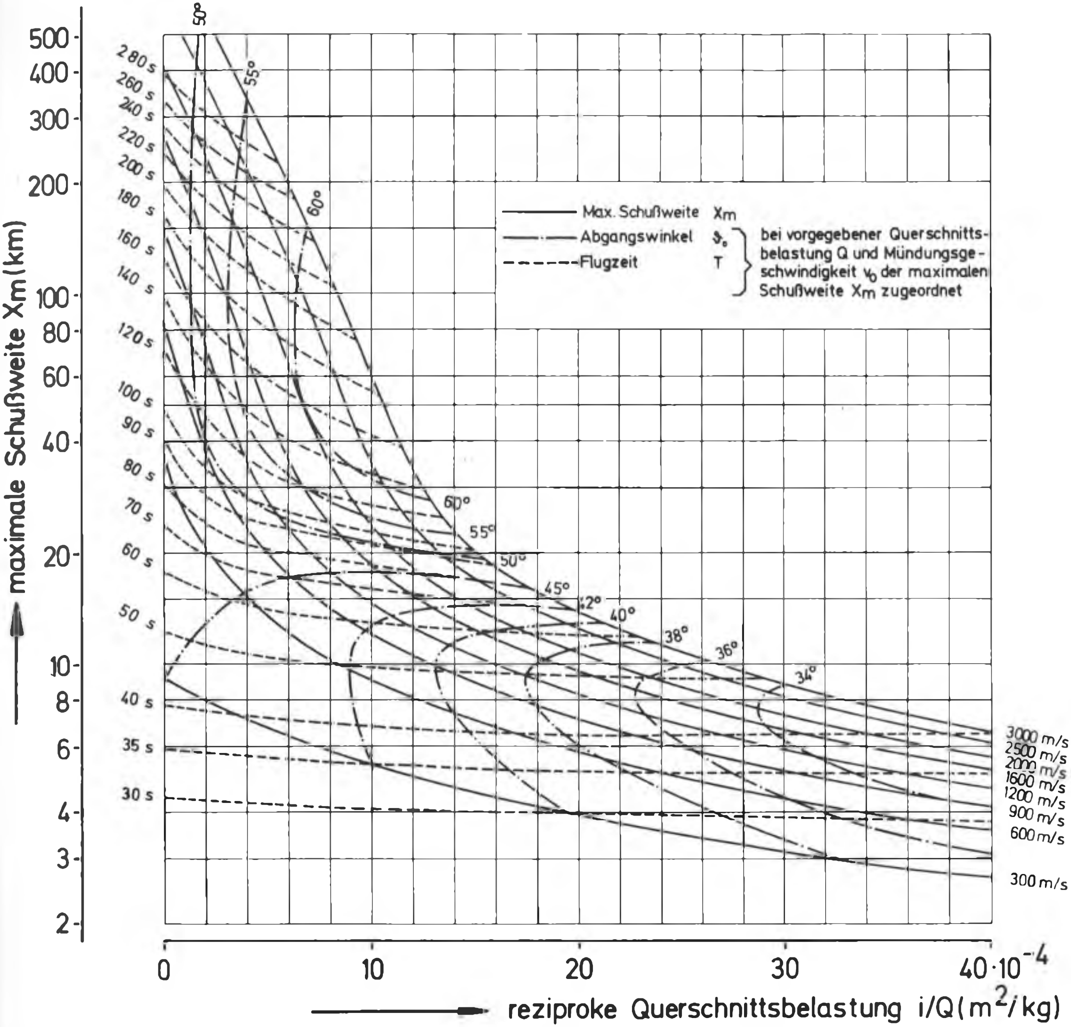


Bild 313. *Maximale Schußweiten X_m in Abhängigkeit von der Querschnittsbelastung Q und der Mündungsgeschwindigkeit v_0.*

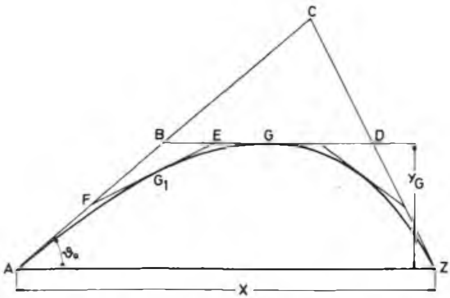


Bild 315. Angenäherte zeichnerische Flugbahndarstellung.

Flugbahn, die Geraden durch BD, FE, ... Tangenten an die Bahn. Analog kann man den absteigenden Ast der Flugbahn zeichnen.

3.2.2.4. Störungsrechnung

Grundlage für das artilleristische Schießen ist die Schußtafel, die immer Normalwerte als Voraussetzung hat. Abweichungen davon werden durch die Störungstafeln, z.B. die BWE-Tafeln (Tafeln der Besonderen und Witterungs-Einflüsse) berücksichtigt, die angeben, was der Schütze zu tun hat, damit bei vorhandener Störung die Normalwerte erreicht werden.

Bild 316 zeigt einen Auszug aus der BWE-Tafel zu der von Rheinmetall erstellten Schußtafel für die 105-mm-Feldhaubitze (L). Die Änderungen der Lufttemperatur beziehen sich auf den Standard 288 K. Die unterschiedlichen Korrekturen für Zu- und Abnahme ergeben sich dadurch, daß sie jeweils Ausgleichswerte für einen Bereich von mehreren Prozenten darstellen.

Die relative Änderung der Schußweite $\Delta X/X$ durch Störungen läßt sich nach

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{\tan\vartheta_0 - \tan\omega}{\tan\omega}\left(\frac{\Delta c_W}{c_W} + \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{2\Delta d}{d} - \frac{\Delta m}{m}\right) +$$

$$+ \frac{3\tan\vartheta_0 - \tan\omega}{\tan\omega}\,\frac{\Delta v_0}{v_0} + (\cot\omega - \tan\vartheta_0)\cdot\Delta\vartheta_0 \qquad (115)$$

6. Ladung										
BWE-Tafel									Tafel 6	
1	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	v_0-Änderg. 1 f/s		Längswind 1 Knoten		Luft-temperatur 1 %		Luftdichte 1 %		Geschoß-gewicht Standard ⊡⊡	
Entfernung	Abnahme	Zunahme	L+	L-	Abnahme	Zunahme	Abnahme	Zunahme	Abnahme -1 ⊡	Zunahme +1 ⊡
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
100	0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.1	- 1	1
200	0.3	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.1	- 2	2
300	0.5	-0.5	0.0	0.0	0.1	-0.1	-0.3	0.2	- 3	3
400	0.6	-0.6	0.0	-0.1	0.1	-0.1	-0.4	0.3	- 4	4
500	0.8	-0.8	0.1	-0.1	0.1	-0.2	-0.5	0.3	- 5	5
600	0.9	-0.9	0.1	-0.2	0.2	-0.3	-0.6	0.4	- 6	6
700	1.0	-1.0	0.2	-0.2	0.2	-0.4	-0.7	0.5	- 6	6
800	1.2	-1.2	0.2	-0.3	0.3	-0.5	-0.8	0.6	- 7	7
900	1.3	-1.3	0.3	-0.4	0.4	-0.7	-0.9	0.7	- 8	8
1000	1.4	-1.4	0.3	-0.5	0.5	-1.0	-1.0	0.8	- 8	8
1100	1.6	-1.6	0.4	-0.6	0.6	-1.2	-1.1	0.9	- 9	9
1200	1.7	-1.7	0.5	-0.8	0.8	-1.5	-1.3	1.0	- 9	9
1300	1.8	-1.8	0.6	-0.9	1.0	-1.9	-1.4	1.1	- 9	9
1400	1.9	-1.9	0.7	-1.1	1.2	-2.2	-1.5	1.3	-10	10
1500	2.0	-2.0	0.9	-1.2	1.5	-2.5	-1.6	1.4	-10	10
1600	2.0	-2.0	1.1	-1.3	1.8	-2.9	-1.8	1.5	-10	11
1700	2.1	-2.1	1.2	-1.5	2.2	-3.3	-1.9	1.7	-11	11
1800	2.2	-2.2	1.3	-1.6	2.6	-3.7	-2.1	1.8	-11	11
1900	2.3	-2.3	1.4	-1.8	3.0	-4.2	-2.2	1.9	-11	11
2000	2.4	-2.4	1.5	-1.9	3.4	-4.6	-2.3	2.1	-11	12
2100	2.5	-2.5	1.7	-2.1	3.8	-5.0	-2.5	2.3	-11	12
2200	2.5	-2.5	1.9	-2.2	4.2	-5.4	-2.6	2.4	-12	12
2300	2.6	-2.6	2.1	-2.4	4.7	-5.8	-2.8	2.6	-12	12
2400	2.7	-2.6	2.3	-2.6	5.2	-6.3	-2.9	2.8	-12	12
2500	2.7	-2.7	2.5	-2.8	5.7	-6.7	-3.1	2.9	-12	12
2600	2.8	-2.8	2.7	-3.0	6.2	-7.1	-3.3	3.1	-12	12
2700	2.9	-2.8	2.9	-3.2	6.7	-7.6	-3.4	3.3	-12	12
2800	3.0	-2.9	3.1	-3.4	7.2	-8.1	-3.6	3.5	-12	12
2900	3.1	-2.9	3.3	-3.6	7.7	-8.5	-3.8	3.6	-12	12
3000	3.1	-3.0	3.5	-3.8	8.2	-8.9	-4.0	3.8	-12	13
3100	3.2	-3.0	3.7	-4.0	8.7	-9.4	-4.2	4.0	-12	13
3200	3.3	-3.1	3.9	-4.2	9.2	-9.8	-4.4	4.2	-12	13
3300	3.3	-3.1	4.1	-4.4	9.7	-10.3	-4.6	4.4	-12	13
3400	3.4	-3.2	4.4	-4.6	10.2	-10.9	-4.8	4.6	-12	12
3500	3.4	-3.2	4.6	-4.8	10.7	-11.3	-5.0	4.8	-12	12

Bild 316. *BWE-Tafel zur Schußtafel für die 105 mm FH (L).*

Die Geschosse werden in Gewichtsklassen eingeteilt. In Spalte 18 und 19 bedeutet das Symbol ⊡⊡, daß die Tafel für ein mittleres Geschoßgewicht innerhalb einer bestimmten Spanne gilt; diese Größe sowie die Abweichungen ⊡ werden in jeder Schußtafel speziell angegeben.

erfassen, wobei

c_W der dimensionslose Widerstandsbeiwert,
ρ die Luftdichte,
d der Geschoßdurchmesser,
m die Geschoßmasse,
v_0 die Anfangsgeschwindigkeit,
ϑ_0 der Abgangswinkel,
ω der Auftreffwinkel

ist.

Für flache Flugbahnen ($\vartheta_0 \leqslant 5^\circ$) nehmen die Vorfaktoren in Gleichung (115) folgende Werte an:

$$\frac{\tan \vartheta_0 - \tan \omega}{\tan \omega} = -0{,}1 \ldots -0{,}5,$$

$$\frac{3 \tan \vartheta_0 - \tan \omega}{\tan \omega} = 2 \ldots 0{,}5,$$

$$\cot \omega \cdot \tan \vartheta_0 = 0{,}9 \ldots 0{,}5.$$

Der *Einfluß der Geschoßmasse und der Pulverdaten* auf die relative Änderung der Anfangsgeschwindigkeit $\Delta v_0 / v_0$ läßt sich nach den folgenden Beziehungen abschätzen:

$$\frac{\Delta v_0}{v_0} = -0{,}3 \ldots -0{,}5 \frac{\Delta m}{m}, \qquad (116)$$

$$\frac{\Delta v_0}{v_0} = 0{,}5 \ldots 0{,}7 \frac{\Delta m_c}{m_c} \qquad (117)$$

(m_c = Pulvermasse),

$$\frac{\Delta v_0}{v_0} = 0{,}0005 \ldots 0{,}002\, \Delta t_c \qquad (118)$$

(Δt_c = Änderung der Pulvertemperatur in °C).

Einfluß der Verkantung:[1]

Wird ein Waffenrohr gemäß Bild 317 um eine Achse, die mit der geplanten Schußebene den Winkel σ bildet, um den Winkel $\Delta\beta$ verkantet, so ändert sich die Erhöhung ϑ_1 um den Winkel

1) Vgl. Abschnitt 6.2.2, Die Schildzapfenverkantung und die dabei entstehenden Richtfehler.

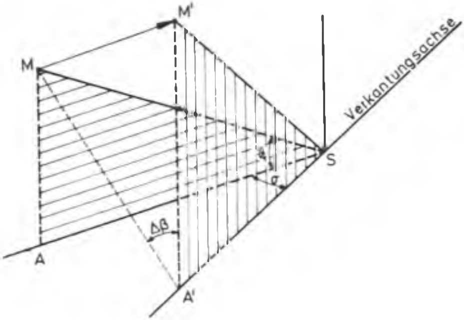


Bild 317. *Verkantung eines Waffenrohres;*
S = Drehpunkt der Schildzapfenachse,
M = Rohrmündung.

$$\Delta \vartheta_1 = -\tan \vartheta_1 (1 - \cos \Delta\beta) + \sin \sigma \sin \Delta\beta; \qquad (119)$$

der Seitenfehler $-\Delta\sigma$ wird

$$-\Delta\sigma = \cos \sigma \tan \vartheta_1 \cdot \Delta\beta. \qquad (120)$$

In Gleichung (119) sind die Größen σ und $\Delta\vartheta_1$ als klein angenommen; in Gleichung (120) wird auch $\Delta\beta$ als klein angesehen.

Wenn die Verkantungsachse in der Schußebene liegt ($\sigma = 0$) und wenn die Größen $\Delta\beta$, $\Delta\vartheta_1$ und $\Delta\sigma$ in Strich ($^-$) gemessen werden, gilt

$$\Delta\vartheta_1^- = -\frac{1}{2000} \tan \vartheta_1 \, (\Delta\beta^-)^2 \qquad (121)$$

und

$$\Delta\sigma^- = \tan \vartheta_1 \, \Delta\beta^-. \qquad (122)$$

Auch *nachdem* das Geschoß das Rohr verlassen hat, ist es Störungen unterworfen. Im folgenden sind die wichtigsten Beziehungen zur Korrektur dieser Einflüsse angegeben.

Einfluß des Längswindes:

Wenn nur Längswind v_{wx} herrscht ($v_{wx} > 0$ ist Mitwind, $v_{wx} < 0$ ist Gegenwind), betragen die Änderungen der Mündungsgeschwindigkeit Δv_0 und des Abgangswinkels $\Delta \vartheta_0$

$$\frac{\Delta v_0}{v_0} = - \frac{v_{wx}}{v_0} \cos\vartheta_0 \qquad (123)$$

und

$$\Delta\vartheta_0 = \frac{v_{wx}}{v_0} \sin\vartheta_0 ; \qquad (124)$$

damit ergibt sich die Schußweite zu

$$X = X(v_0, \vartheta_0) + v_0 \frac{\partial X}{\partial v_0} \frac{\Delta v_0}{v_0} + \frac{\partial X}{\partial \vartheta_0} \Delta\vartheta_0 + v_{wx} T, \qquad (125)$$

wobei die Größen

$$v_0 \frac{\partial X}{\partial v_0} \quad \text{und} \quad \frac{\partial X}{\partial \vartheta_0}$$

den BWE-Tafeln zu entnehmen sind.

Einfluß des Querwindes:

Wenn nur Querwind v_{wz} herrscht, bleibt die Schußweite X erhalten; es tritt aber eine Seitenabweichung

$$Z = v_{wz} \left(T - \frac{X}{v_0 \cos\vartheta_0}\right) \text{ (Didionsche Gleichung) [1]} \qquad (126)$$

in Windrichtung auf (s. auch Abschnitt 3.3.2.1).

Einfluß des Dralls:

Bei Drallgeschossen kann die Seitenabweichung Z (Rechtsabweichung bei Rechtsdrall) in guter Näherung nach

$$Z = K X \tan\vartheta_0 \qquad (127)$$

mit K ≈ 0,03 . . . 0,04 ermittelt werden.

Die Drehung der Erde um die Nord-Süd-Achse bewirkt das Auftreten der Zentrifugalkraft (in der Erdbeschleunigung g (S. 125) berücksichtigt) und der Corioliskraft und damit sowohl eine Längs- als auch eine Seitenabweichung.

Wenn
X die Schußweite,
T die Flugzeit,
ϑ_0 der Abgangswinkel,
ω der Auftreffwinkel,

- λ die geographische Breite,
- φ die Abweichung der Schußrichtung von Nord im Uhrzeigersinn

ist, lassen sich die Rotationskoeffizienten

$$A = 0{,}00002431 \cdot T\,[346\,\Delta X(\vartheta_{0,10'}) + 1{,}8\,X \cot \omega], \tag{128}$$

$$B = 0{,}00003646 \cdot T \cdot X\,\left(\frac{3 \tan \vartheta_0 + \tan \omega}{\tan \vartheta_0 + \tan \omega}\right), \tag{129}$$

$$C = 0{,}00001215 \cdot T \cdot X \cdot \tan \vartheta_0\,\left(\frac{19 \tan \vartheta_0 + \tan \omega}{7 \tan \vartheta_0 + 3 \tan \omega}\right) \tag{130}$$

angeben [13]; dabei ist die Flugzeit T in Sekunden einzusetzen. Die Größe $\Delta X\ (\vartheta_{0,10'})$ entspricht einer Änderung der Schußweite X bei einer Vergrößerung des Abgangswinkels ϑ_0 um 10 Minuten.

Einfluß der Erddrehung auf die Längsabweichung:

$$\Delta X = A \cos \lambda \sin \varphi. \tag{131}$$

Die Schußweite wird also bei Schußrichtung nach Osten vergrößert, bei Schußrichtung nach Westen verkleinert.

Einfluß der Erddrehung auf die Seitenabweichung:

$$Z = B \sin \lambda - C \cos \lambda \cos \varphi. \tag{132}$$

Bei Breitengraden $|\varphi| > 10^\circ$ ist der erste Summand in Gleichung (132) größer als der zweite; auf der Nordhalbkugel tritt also im allgemeinen Rechtsabweichung, auf der Südhalbkugel Linksabweichung auf.

3.2.3. Stabilität und Folgsamkeit

3.2.3.1. Die Pendelung des Drallgeschosses

Das fliegende Drallgeschoß gehorcht als rotierender Körper (Drehung um die Längsachse) den Kreiselgesetzen [1], [4], [5], [14]: Die Geschoßspitze liege oberhalb der Bahntangente und das Geschoß habe Rechtsdrall (Bild 318). Die mit der Geschwindigkeit v anströmende Luft, die im Druckpunkt D vor dem Schwerpunkt S angreift, übt ein Moment auf den Körper aus und versucht, die Spitze weiter aufzurichten (destabilisierendes Moment). Ein schnellaufender Kreisel hat nun aber die Eigenschaft, daß er senkrecht zur Richtung der Störkraft ausweicht, und zwar in dem Sinne, daß die Spitze des Geschosses bestrebt ist, sich dem Vektor des Momentes parallel zu stellen (Drallstabilisierung) [1]. Der Vektor des Luftkraftmomentes steht senkrecht auf der Zeichenebene, seine Spitze ist vom Betrachter

abgewandt. Also tritt infolge des Momentes die Spitze senkrecht nach hinten in die Papierebene hinein. Man beobachtet ein „Fortschreiten der Figurenachse", d.h. die Geschoßspitze beschreibt eine kreisförmige Bewegung (Winkel ψ) um die Vertikale (Präzession), der sich eine zweite, schnellere Bewegung (Nutation, Winkel α) überlagert.

Das rotierende Geschoß wird als stabil angesehen, wenn der Anstellwinkel α mit der Zeit abklingt. Daß der Anstellwinkel selbst klein bleibt, wird von vornherein angenommen; wesentlich ist aber, daß ein durch eine Störung erzeugter Anstellwinkel auch wieder verschwindet [1].

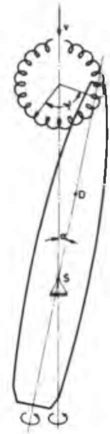


Bild 318.
Pendelung des Drallgeschosses.

3.2.3.2. Die Pendelgleichung

Die Beschreibung der Pendelung des Drallgeschosses wird durch Darstellung mit komplexen Zahlen erleichtert. Legt man die Gaußsche Zahlenebene so, daß sie in ihrem Ursprung von der Bahntangente senkrecht durchstoßen wird, dann kann man die jeweilige Achslage des Geschosses, die durch den Anstellwinkel α und den Präzessionswinkel ψ festgelegt ist, durch den komplexen Anstellwinkel

$$\zeta = \alpha \sin \psi + i \alpha \cos \psi \tag{133}$$

kennzeichnen.

Unter Vernachlässigung der Schwerkraft, d.h. für fast horizontale gerade Bahnen (Bahnkoordinate s = x), gilt die *Differentialgleichung der Pendelbewegung*

$$\frac{d^2 \zeta}{dx^2} + (A_1 + i\,B_1)\frac{d\zeta}{dx} + (A_2 + i\,B_2)\zeta = 0 \tag{134}$$

mit den Koeffizienten

$$A_1 = (c_a^* - c_w)\frac{\pi}{8}\frac{\rho\, d^2}{m} - c_h \frac{\pi\rho\, d^4}{8\, J_q}\,, \tag{135}$$

$$B_1 = \frac{J_l\,\omega}{J_q\, v}\,, \tag{136}$$

$$A_2 = -\, c_m^* \frac{\pi}{8}\frac{\rho\, d^3}{J_q} \tag{137}$$

und

$$B_2 = c_a^* \frac{J_l}{J_q}\frac{\pi}{8}\frac{\rho d^2 \omega}{m v} - c_j^* \frac{\pi \rho\, d^4 \omega}{8\, J_q\, v}\,, \tag{138}$$

wobei
ρ die Luftdichte,
d der Geschoßdurchmesser,
m die Geschoßmasse,
J_l das Trägheitsmoment um die Längsachse,
J_q das Trägheitsmoment um eine Querachse durch den Schwerpunkt,
v die Geschoßgeschwindigkeit,
ω die Geschoßwinkelgeschwindigkeit

ist; zur Erklärung der Beiwerte c_w, c_h, c_a^*, c_m^* und c_j^* sei auf die Gleichungen (21), (47), (37), (39) und (53) verwiesen. Für normale Artilleriegeschosse, die sich in ihrer Geometrie und ihrem Aufbau ähneln, gilt näherungsweise

$$\frac{J_q}{J_l} \approx 10. \tag{139}$$

Für Hohlladungsgeschosse ist dieses Verhältnis wesentlich kleiner.

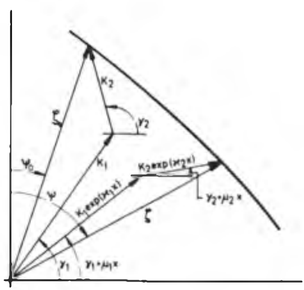


Bild 319. *Darstellung der Pendelbewegung in der Gaußschen Zahlenebene* [5]; $\zeta_0 = \zeta(x = 0)$, $\psi_0 = \psi(x = 0)$.

Als Lösung der Differentialgleichung (134) erhält man bei konstanten Koeffizienten

$$\zeta = K_1 \exp(i\gamma_1) \ \exp[(\kappa_1 + i\mu_1)x] + $$
$$+ K_2 \exp(i\gamma_2) \ \exp[(\kappa_2 + i\mu_2)x]. \qquad (140)$$

Die Bewegung von ζ kann also als Drehung zweier Vektoren der Länge $K_1 \exp(\kappa_1 x)$ bzw. $K_2 \exp(\kappa_2 x)$ in der Gaußschen Zahlenebene dargestellt werden. Die Vektoren beginnen bei den Winkeln γ_1 bzw. γ_2 und drehen sich um die Winkel $\mu_1 x$ und $\mu_2 x$ (geometrische Addition) (Bild 319); ihre Längen ändern sich dabei mit den Faktoren $\exp(\kappa_1 x)$ bzw. $\exp(\kappa_2 x)$.

Zwischen den Winkeldrehungen je Längeneinheit μ_1 und μ_2, den Dämpfungskonstanten κ_1 und κ_2 und den Koeffizienten (Gleichungen (135) bis (138)) der Differentialgleichung (134) bestehen die Beziehungen

$$A_1 = -(\kappa_1 + \kappa_2), \qquad (141)$$

$$B_1 = -(\mu_1 + \mu_2), \qquad (142)$$

$$A_2 = -\mu_1 \cdot \mu_2, \qquad (143)$$

$$B_2 = \mu_1 \kappa_2 + \mu_2 \kappa_1, \qquad (144)$$

wobei in Gleichung (143) der Summand $\kappa_1 \kappa_2$ als klein vernachlässigt ist. Aus den Gleichungen (133) und (140) ergibt sich, daß der Anstellwinkel $\alpha = \alpha(x)$ einen periodisch mit der Frequenz $\mu_1 - \mu_2$ schwankenden Verlauf hat.

Der Abstand zweier Maxima des Anstellwinkels α, die Schwingungslänge, ist also

$$L_N = \frac{2\pi}{\mu_1 - \mu_2}. \qquad (145)$$

3.2.3.3. Das Molitzsche Stabilitätsdreieck[1]

Ein Drallgeschoß wird nach Abschnitt 3.2.3.1 als stabil angesehen, wenn ein durch eine Störung erzeugter Anstellwinkel auch wieder verschwindet. Ein Kreisel, dessen Kraftangriffspunkt oberhalb des Unterstützungspunktes liegt, kippt nicht um, wenn für den Stabilitätsfaktor

$$s = \frac{J_l^2 \omega^2}{4 J_q M_L^*} \qquad (146)$$
[2]

1) Die Darstellung lehnt sich an die moderne Behandlung durch Molitz [1] an.

2) Exakt: $s = \dfrac{J_l^2 \omega^2 \sin\alpha}{4 J_q M_L}$, woraus mit der Näherung $\sin\alpha \approx \alpha$ Gleichung (146) folgt.

die Bedingung

$$s > 1 \tag{147}$$

erfüllt ist (klassischer Stabilitätsfaktor), wobei die Größe M_L^* nach den Gleichungen (31), (36), (39) und (54)

$$M_L^* = c_m^* \frac{\rho}{2} v^2 \frac{\pi}{4} d^3 \tag{148}$$

ist. Durch die Forderung (147) wird aber nur das Moment M_L der Luftkraft L berücksichtigt. Zieht man auch die Reibung und andere Momente in die Betrachtung ein, so führt das auf die strengere Bedingung

$$s > \frac{1}{4\hat{s}\,(1-\hat{s})}, \tag{149}$$

wobei

$$\hat{s} = \frac{c_a^* - \dfrac{md^2}{J_l} c_j^*}{c_a^* - c_w + \dfrac{md^2}{J_q} c_h} \tag{150}$$

ist. Die Beziehung (149) wird anschaulicher, wenn man

$$\sigma = \sqrt{1 - \frac{1}{s}} \tag{151}$$

einführt; sie geht dann in

$$\sigma > |2\hat{s} - 1| \tag{152}$$

über, was in Bild 320 dargestellt ist.

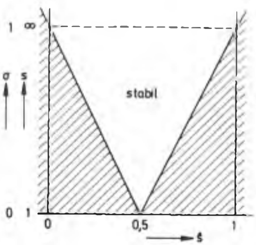


Bild 320. *Molitzsches Stabilitätsdreieck.*

Bild 320 zeigt das Winkelfeld, in dem das Drallgeschoß nach Bedingung (149) stabil ist. Drallgeschosse sind also stabil, wenn $s > 1$ ist und σ in dem durch Bedingung (152) gegebenen Winkelbereich in Bild 320 liegt. Bei Flügelgeschossen (Pfeilgeschossen), bei denen der Druckpunkt hinter dem Schwerpunkt liegt, wird $s < 0$, also $\sigma > 1$; ihr Bildpunkt liegt im oberen Teil des Stabilitätswinkelfeldes (Bild 321), und zwar um

so höher, je geringer der Drall ist. Bei drallfreien Flügelgeschossen wird $s = 0$, d.h. $\sigma = +\infty$; sie sind für jedes $\hat{s}$ stabil. Der Drall eines Pfeilgeschosses schränkt den Stabilitätsbereich ein, und zwar um so mehr, je größer die Winkelgeschwindigkeit ω ist [1].

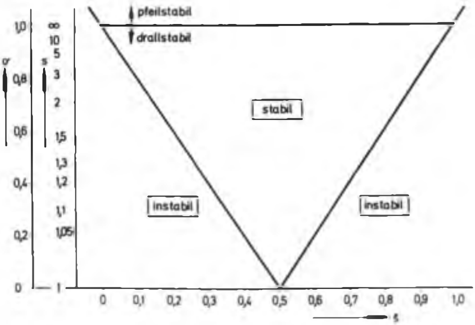


Bild 321. *Stabilitätsbereiche (s, ŝ -Diagramm).*

Die Faktoren s, $\hat{s}$ und σ stehen in direktem Zusammenhang mit den Koeffizienten A_1, A_2, B_1 und B_2 (Gleichungen (141) bis (144)), und zwar gilt

$$s = -\frac{B_1^2}{4\,A_2} \qquad (153)$$

oder mit den Gleichungen (142) und (143)

$$s = \frac{(\mu_1 + \mu_2)^2}{4\,\mu_1\,\mu_2}\,. \qquad (154)$$

Entsprechend ergeben sich für die Größen σ und $\hat{s}$ die Beziehungen

$$\sigma = \frac{1}{B_1}\sqrt{B_1^2 + 4\,A_2} \qquad (155)$$

oder

$$\sigma = -\frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \qquad (156)$$

und

$$\hat{s} = \frac{B_2}{A_1 B_1} \qquad (157)$$

oder

$$\hat{s} = \frac{1}{2}\left(1 - \sigma\,\frac{\kappa_1 - \kappa_2}{\kappa_1 + \kappa_2}\right). \qquad (158)$$

3.2.3.4. Der Folgsamkeitsfaktor

Der Stabilitätsfaktor s (Gleichung (146)) nimmt während des Fluges zu. Da M_L^* im wesentlichen proportional zu v^2 ist (Gleichung (148)) und ω bedeutend schwächer als v abnimmt (nach einer Exponentialfunktion), wird der Term $\frac{\omega^2}{v^2}$ während des Fluges größer.

Wenn der Stabilitätsfaktor s zu groß ist, kann die Geschoßachse der Bahntangente einer gekrümmten Flugbahn nicht mehr folgen. Das führt z.B. zu dem bei sehr steilen Schüssen bekannten Effekt, daß das Geschoß mit dem Boden voran auftrifft.

Die Forderung, daß der Winkel zwischen momentaner Präzessionsachse des kreiselnden Geschosses und der Bahntangente möglichst klein sein soll, führt auf die Bedingung, daß der Folgsamkeitsfaktor

$$f = \frac{M_L^* \, v}{J_l \, \omega \, g \cos \vartheta}, \tag{159}$$

der im wesentlichen das Verhältnis von Präzessionsgeschwindigkeit $d\psi/dt$ und Änderung der Bahnneigung $-\frac{g}{v}\cos\vartheta$ ist, möglichst groß ist.

Substituiert man mit Gleichung (148) die Größe M_L^*, so wird

$$f = \frac{\pi c_m^* \rho d^3 v^3}{8 J_l \, \omega g \cos \vartheta}, \tag{160}$$

andererseits läßt sich der Folgsamkeitsfaktor f mit Gleichung (146) auch in Abhängigkeit vom Stabilitätsfaktor s darstellen:

$$f = \frac{J_l \, v \, \omega}{4 J_q \, g \cos \vartheta} \cdot \frac{1}{s}. \tag{161}$$

Die Gegenläufigkeit von s und f führt dazu, daß man s nach Gleichung (147) nicht beliebig groß macht; in der Praxis haben sich Geschosse mit s = 1,3 . . . 1,8 gut bewährt.

3.2.3.5. Experimentelle Bestimmung aerodynamischer Beiwerte und der Geschoßstabilität

3.2.3.5.1. Windkanalmessungen

Die übliche Dreikomponentenmessung (Mehrkomponentenwaage) im Windkanal liefert Widerstand, Auftrieb und Druckpunktlage in Abhängigkeit vom Anstellwinkel α und der Machschen Zahl M. Damit lassen sich mit den Gleichungen (21), (28), (34), (37), (41) und (42) die Beiwerte c_W, c_a, c_n^* und c_m^* und daraus mit den Gleichungen (136),

(137), (153) und (155) die Stabilitätsfaktoren s und σ berechnen, was für viele Fälle ausreichend ist.

Die Ermittlung weiterer Beiwerte erfordert einen erheblich größeren apparativen Aufwand; im allgemeinen lassen sich diese Beiwerte günstiger in einer Freifluganlage bestimmen.

3.2.3.5.2. **Messen in einer Freifluganlage**

In der Freifluganlage [1], [5] wird die Flugbahn eines zum Pendeln angeregten Geschosses vermessen, wodurch man den Verlauf des Anstellwinkels $\alpha(x)$ und des Präzessionswinkels $\psi(x)$ und damit die Geschoßlage in Abhängigkeit vom Geschoßweg x über mindestens zwei Maxima von α erhält (Bild 322). Dazu haben sich Papierscheiben bewährt, von denen 20 bis 30 hintereinander aufgestellt werden (für 30-mm-Geschosse z.B. Packpapierscheiben im Abstand von etwa 1 m). Der Abstand zweier Maxima des Anstellwinkels α (Gleichung (145)) läßt sich nach

$$L_N = 1{,}2 \ldots 1{,}5\, D \frac{J_q}{J_l} \tag{162}$$

abschätzen, wobei D die Drallänge (Ganghöhe des Zuges) ist. [1]

Die bei $\alpha(x) > 0$ ovalen Durchschußlöcher liefern bei bekannter Geschoßgeometrie die Abhängigkeit der Winkel $\alpha(x)$ und $\psi(x)$ vom Geschoßweg, aus der die Größen μ_1, μ_2, κ_1 und κ_2 ermittelt werden. Mit der allgemeinen Theorie (Abschnitt 3.2.3.2) läßt sich zeigen, daß

$$\mu_1 = -\frac{\psi_2 - \psi_1}{x_2 - x_1} \tag{163}$$

und

$$\mu_2 = -\frac{2\pi + \psi_2 - \psi_1}{x_2 - x_1} \tag{164}$$

gilt (Bild 322), woraus mit Gleichung (145) die Schwingungslänge

$$L_N = x_2 - x_1 \tag{165}$$

folgt. Wenn man auf einfach-logarithmischem Papier die Funktionen $\alpha|\cos(\psi + \gamma_1 + \mu_1 x)|$ und $\alpha|\cos(\psi + \gamma_2 + \mu_2 x)|$ aufträgt, ergibt sich nach derselben Theorie, daß die oberen Grenzkurven Geraden mit der Steigung κ_1 bzw. κ_2 sind. Meist genügt es, hierfür nur die den Abszissen

$$x_i = x_{i\,max} \pm \frac{L_N}{4} \tag{166}$$

zugeordneten Werte α_i und ψ_i zu nehmen.

---

1) Vgl. Abschnitt 11.5.1.

Mit den Größen μ_1, μ_2, κ_1 und κ_2 lassen sich dann nach Abschnitt 3.2.3.2 die Stabilitätsfaktoren s bzw. σ und $\tilde{s}$ sowie der Beiwert c_m^* berechnen. Mit s und $\tilde{s}$ kann man anhand des Molitzschen Stabilitätsdreiecks (Bild 320) die Stabilität des untersuchten Modells prüfen.

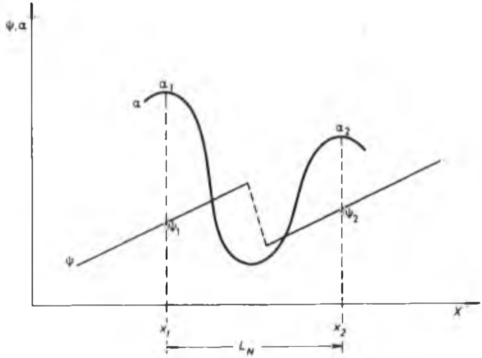


Bild 322. Pendelverlauf des Anstellwinkels α und des Präzessionswinkels ψ in Abhängigkeit vom Geschoßweg x über zwei Maxima von α.

Andere aerodynamische Beiwerte lassen sich mit Hilfe folgender Überlegung ermitteln:

Man bestimmt die Abhängigkeit der Größe c_m^* von der Schwerpunktslage l_S (Bild 307), indem man Messungen an geometrisch gleichen Geschossen mit unterschiedlicher Schwerpunktslage l_S durchführt. Wegen des linearen Zusammenhangs (42)

$$c_m^* = c_n^* \frac{l_D - l_S}{d}$$

ergibt der Schnittpunkt der Geraden c_m^* (l_S) mit der l_S-Achse die Länge l_D; damit läßt sich der Beiwert c_n^* nach Gleichung (42) berechnen.

Setzt man eine parallel verlaufende Messung des Beiwertes c_W voraus, so erhält man für den Beiwert c_a^* nach Gleichung (41) die Beziehung

$$c_a^* = c_n^* - c_W. \tag{167}$$

Die Beiwerte c_h und c_j^* ergeben sich durch einfache Rechnung aus den Gleichungen (135) und (138):

$$c_h = \frac{J_q}{m\, d^2} \left[\frac{8\, m}{\pi \rho d^2} A_1 - (c_a^* - c_W)\right], \tag{168}$$

$$c_j^* = \frac{J_l}{md^2} \, [- \frac{8 J_q m v}{\pi J_l \rho d^2 \omega} B_2 + c_a^*]. \tag{169}$$

Wegen der linearen Beziehung (Gleichung (55))

$$c_j^* = c_k^* \frac{l_K - l_S}{d}$$

lassen sich in gleicher Weise wie oben die Lage des Druckpunktes der Magnuskraft l_K und der Beiwert c_K^* bestimmen.

3.2.3.6. Pfeilstabile Geschosse

Pfeilstabile (flügelstabilisierte) Geschosse unterscheiden sich von drallstabilen Geschossen dadurch, daß ihr Schwerpunkt zwischen Geschoßspitze und Luftangriffspunkt (Druckpunkt) liegt (Abschnitt 3.2.3.3). Das wird einerseits durch geeignete Massenverteilung (Schwerpunkt), andererseits durch Heckleitwerke erreicht, durch die der Luftangriffspunkt in Richtung auf den Geschoßboden hin verlegt wird. Heckleitwerke sind wirksamer, wenn sie über das Kaliber hinausragen; andernfalls darf der Abstand zwischen Leitwerk und Geschoßschwerpunkt nicht zu klein sein. Flügelgeschosse sind auf allen Teilen der Flugbahn folgsam, weil sie wegen der hohen Dämpfung immer schnell wieder in die Tangentenrichtung der Flugbahn einpendeln.

Pfeilstabile Geschosse bedürfen zwar keines Dralls; man sollte sie aber durch leichte Anstellung der Leitwerke mit mehreren hundert Umdrehungen je Minute rollen lassen, weil dadurch Fehler in der erwarteten Flugbahn infolge kleiner Unsymmetrien der Geschosse weitgehend ausgeglichen werden. Dabei ist darauf zu achten, daß bei n Leitwerken die Rollfrequenz ν_R nicht in der Nähe der Eigenfrequenz der Geschoßpendelung liegt; mit den Gleichungen (31), (36) und (39) ergibt sich daraus die Forderung

$$2 \pi n \nu_R \neq \sqrt{\frac{c_m^* \rho v^2 \pi d^3}{8 J_q}} \, . \tag{170}$$

Vorteile flügelstabilisierter Projektile gegenüber drallstabilen Projektilen:

- Möglichkeit größerer Geschoßlänge und damit größerer Querschnittsbelastung, Reichweite und Durchschlagskraft,
- Verwendung nichtrotationssymmetrischer Geschosse,
- Möglichkeit zur Steuerung der Geschosse über Leitwerke,
- Verschießen von Wirkteilen, die drallempfindlich sind (Hohlladungen).

Nachteile flügelstabilisierter Projektile gegenüber drallstabilen Projektilen:

- im allgemeinen höherer c_W-Wert, bezogen auf den Geschoßquerschnitt,
- schwierigere Darstellung der Sicherheitsfunktion der Geschoßzünder,
- teilweise aufwendigere Fertigung.

Die Energieverluste durch Reibung (Abschnitt 3.2.1.1) verursachen hinter dem Flugkörper eine Verminderung der Geschwindigkeit und des statischen Druckes der Strömung. Die Ablösung der Grenzschicht, wie sie in erster Linie bei stumpfen Körpern (Kreiszylinder, Kugel) auftritt, ist immer mit starker Wirbelbildung und großen Energieverlusten verbunden. Auf der Rückseite stumpfer Körper bildet sich damit ein Gebiet stark abgebremster Strömung aus, sog. Totwasser. Abgelöste Strömungen weisen besonders große Totwasser auf.

Das Zusammenwirken der Luftkräfte an Geschoßkörper und Leitwerk, ihre gegenseitige Beeinflussung (Interferenz), spielt eine wichtige Rolle und führt im allgemeinen dazu, daß die Leitwerke nur teilweise wirksam sind. Das ist eine zusätzliche Schwierigkeit bei pfeilstabilen Geschossen gegenüber drallstabilen.

3.3. Äußere Ballistik der Rakete

Gegenüber der Ballistik antriebsfreier Projektile, die bisher behandelt wurde, tritt bei der Berechnung der Flugbahn von Raketen der Schub als wesentliches neues Glied in den Bewegungsgleichungen auf.

3.3.1. Die Raketenbahn im luftleeren Raum

Die Bewegungsgleichung einer Rakete im gravitationsfreien und luftleeren Raum läßt sich als

$$m \frac{dv}{dt} = - \frac{dm}{dt} u_{eff} \tag{171}$$

schreiben, wie in Abschnitt 2.3, Innere Ballistik der Raketen (Gleichung (67)), abgeleitet wurde; dabei ist

t	die Zeit,
v	die Raketengeschwindigkeit,
m	die Raketenmasse und
u_{eff}	die effektive Ausströmgeschwindigkeit der Treibgase;

Die Raketenmasse m zu jeder Zeit ist veränderlich. Sie ergibt sich aus der Beziehung

$$m = m_0 + \int_0^t \frac{dm}{dt}\, dt \tag{172}$$

mit der Anfangsmasse m_0. Führt man für die je Zeiteinheit ausströmende Masse $\frac{dm}{dt}$ die Bezeichnung

$$\mu = -\frac{dm}{dt}\ ^{1)} \tag{173}$$

ein, so wird aus Gleichung (172) bei konstantem μ

$$m = m_0 - \mu\, t. \tag{174}$$

Das Produkt $\frac{dm}{dt} \cdot u_{eff}$ wird als Schub S bezeichnet:

$$S = \frac{dm}{dt}\, u_{eff}. \tag{175}$$

Mit den Anfangsbedingungen (t = 0)

$$m = m_0 \tag{176}$$

und

$$v = v_0 \tag{177}$$

erhält man nach einmaliger Integration von Gleichung (171) die Raketengeschwindigkeit v zu

$$\frac{v - v_0}{u_{eff}} = -\ln \frac{m}{m_0}. \tag{178}$$

Eine weitere Integration liefert die Abhängigkeit des Weges von der Zeit. Mit

$$v = \frac{dx}{dt} \tag{179}$$

und der Beziehung (174) kann man Gleichung (178) als

$$dx = (v_0 - u_{eff} \ln \frac{m_0 - \mu\, t}{m_0})\, dt \tag{180}$$

schreiben, woraus sich nach Integration bei der Anfangsbedingung (t = 0)

$$x = 0 \tag{181}$$

---

1) Diese Größe μ ist nicht mit dem Massenverhältnis μ zu verwechseln (Innere Ballistik, Gleichung (74)).

$$x = v_0 t + u_{eff} \frac{m_0}{\mu} \left(\frac{m_0 - \mu t}{m_0} \ln \frac{m_0 - \mu t}{m_0} - \frac{m_0 - \mu t}{m_0} + 1 \right) \quad (182)$$

ergibt. Durch Rücksubstitution der Raketenmasse m (Gleichung (174)) erhält man schließlich

$$x = v_0 t + u_{eff} \frac{m}{\mu} \left(\frac{m_0}{m} - 1 - \ln \frac{m_0}{m} \right), \quad (183)$$

was sich mit Gleichung (174) auch als

$$x = v_0 t + u_{eff}\, t \left(1 - \frac{\ln \frac{m_0}{m}}{\frac{m_0}{m} - 1} \right) \quad (184)$$

bzw. mit den Gleichungen (179) und (180) als

$$x = v_0 t + u_{eff} \frac{m_0}{\mu} - (v - v_0 + u_{eff}) \frac{m}{\mu} \quad (185)$$

schreiben läßt.

Bewegt sich die Rakete im Schwerefeld, so ist in der Bewegungsgleichung (171) zusätzlich die Schwerkraft mg zu berücksichtigten. Für den Fall, daß die Rakete senkrecht nach oben verschossen wird, gilt dann die Beziehung

$$m \frac{dv}{dt} = \mu\, u_{eff} - mg \quad (186)$$

oder mit Gleichung (174)

$$(m_0 - \mu t) \frac{dv}{dt} = \mu u_{eff} - (m_0 - \mu t)\, g. \quad (187)$$

Einmalige Integration[1]) (g = const.) mit den Anfangsbedingungen (t = 0)

$$v = v_0 \quad (188)$$

und $$m = m_0 \quad (189)$$

führt auf die Raketengeschwindigkeit v als Funktion der Zeit t:

$$v - v_0 = \frac{dy}{dt} = - u_{eff} \ln \frac{m}{m_0} - gt, \quad (190)$$

1) Die Integrationen entsprechen bis auf das zusätzliche Integral $\int - g dt$ denen der Gleichungen (178) bzw. (184).

eine weitere Integration mit der Anfangsbedingung (t = 0)

$$y = 0 \tag{191}$$

auf die Raketenhöhe y als Funktion der Zeit t:

$$y = v_0 t - \frac{g}{2} t^2 + u_{eff} \frac{m}{\mu} \left(\frac{m_0}{m} - 1 - \ln \frac{m_0}{m}\right). \tag{192}$$

3.3.2. Die Raketenbahn im lufterfüllten Raum

In diesem allgemeinen Fall sind in den Bewegungsgleichungen die Schwerkraft mg, der Schub S und der Luftwiderstand W zu berücksichtigen. Die beiden letztgenannten Kräfte sollen nur in Bewegungsrichtung wirksam sein, so daß man in Erweiterung der Gleichung (186) die Beziehung

$$m \frac{dv}{dt} = S - W - mg \sin \vartheta \tag{193}$$

erhält; außerdem gilt entsprechend Gleichung (73)

$$v \frac{d\vartheta}{dt} = -g \cos \vartheta. \tag{194}$$

Dieses Differentialgleichungssystem zur Bestimmung der beiden Funktionen v(t) und ϑ(t) mit zeitabhängiger Masse m und zeitabhängigem Schub S läßt sich im allgemeinen nur numerisch lösen. Die Koordinaten v und ϑ lassen sich durch die Gleichungen (66) und (67)

$$\frac{dx}{dt} = v \cos \vartheta$$

und
$$\frac{dy}{dt} = v \sin \vartheta$$

wieder an die üblichen (kartesischen) Koordinaten anschließen .

3.3.2.1. Einfluß des Seitenwindes und des Abkippeffektes auf Raketen

Die Beschleunigungs- und die Marschtriebwerke unterscheiden sich durch ihr Schubprogramm; bei den ersteren ist man bemüht, den Impuls möglichst rasch aufzubringen, um möglichst große Reichweiten und kurze Flugzeiten zu erhalten. Bei den Marschtriebwerken hingegen versucht man den Schub so auszulegen, daß der Luftwiderstand der Rakete kompensiert wird: Die Flugbahn ist dann, da auf das Projektil nur die Gravitationskraft wirkt, praktisch mit der Vakuumparabel identisch.

Mit der Komponente der Geschoßgeschwindigkeit in x-Richtung

$$v_{ox} = v_o \cos \vartheta_o \tag{195}$$

und der mittleren horizontalen Geschwindigkeitskomponente

$$\bar{v}_x = \frac{X}{T}, \tag{196}$$

die ungefähr mit der Gipfelgeschwindigkeit übereinstimmt, läßt sich die Didionsche Gleichung (126) für die Seitenabweichung von Projektilen durch Querwind auch

$$Z = v_{wz}\, T\, (1 - \frac{\bar{v}_x}{v_{ox}}) \tag{197}$$

schreiben. Aus dieser Gleichung liest man ab, daß ein beschleunigtes Projektil ($\bar{v}_x > v_{ox}$) sich während der Beschleunigungsphase gegen den Wind stellt, ein verzögertes Projektil (Geschoß) ($\bar{v}_x < v_{ox}$) mit dem Wind abgetrieben wird und ein durch ein Marschtriebwerk angetriebenes Projektil ($\bar{v}_x = v_{ox}$) seitenwindunempfindlich ist. Dabei ist stets vorausgesetzt, daß das Geschoß sich sofort mit seiner Längsrichtung in Anblasrichtung einstellt. Einpendelungseinflüsse, die von einer verzögerten Einstellung herrühren, sowie Abkippeffekte, die bei Raketen beim Verlassen der Startschiene auftreten und ebenfalls zu gedämpften Pendelschwingungen führen, sind dabei nicht berücksichtigt. Wegen der kleinen Anfangsgeschwindigkeit v_o von Raketen ergeben sich bei Seitenwind relativ große Anstellwinkel. Ohne Berücksichtigung dieses Effektes führt die Didionsche Gleichung (126) zu vollkommen falschen Ergebnissen. Molitz gibt dafür eine erweiterte Gleichung an [15]. Andererseits führen auch die schon erwähnten Abkippeffekte zu erheblich abweichenden Schußweiten [16].

3.4. Bombenballistik

Der Abwurf eines Körpers aus einem Flugzeug kann, wie schon eingangs erwähnt, als Sonderfall des Schusses behandelt werden. Die Gesetze für den Schuß im luftleeren und lufterfüllten Raum gelten sinngemäß also auch hierfür, wenn man von systembedingten Einpendelvorgängen absieht.

3.4.1. Abwurf im luftleeren Raum

Wenn ein Flugzeug, das mit der Geschwindigkeit v_F unter einem beliebigen Winkel ϑ_o zur Horizontalen fliegt, eine Bombe frei fallen läßt (Bild 323) [17], bewegt sich diese entsprechend Gleichungen (7) und (8) längs der Bahnkoordinaten

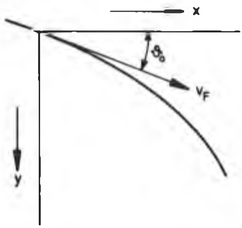


Bild 323. *Bombenflugbahn.*

$$x = v_F t \cos \vartheta_0 \tag{198}$$

und

$$y = v_F t \sin \vartheta_0 + \frac{g}{2} t^2, \tag{199}$$

so daß sich die Flugbahngleichung

$$y = x \tan \vartheta_0 + \frac{g x^2}{2 v_F^2 \cos^2 \vartheta_0} \tag{200}$$

ergibt. Gleichung (198) entspricht Gleichung (7); die Gleichungen (199) und (200) unterscheiden sich von den entsprechenden Gleichungen (8) und (9) nur dadurch, daß der zweite Term addiert statt subtrahiert wird. Das rührt daher, daß die positive y-Richtung nach unten, also in Richtung der Fallbeschleunigung g, gewählt wurde. Aus Gleichung (200) erhält man mit der Abwurfhöhe y_0 die Wurfweite

$$X = \left(-\tan \vartheta_0 + \sqrt{\tan^2 \vartheta_0 + \frac{2 g\, y_0}{v_F^2 \cos^2 \vartheta_0}}\right) \frac{v_F^2 \cos^2 \vartheta_0}{g}. \tag{201}$$

Die Bombe fliegt also um so weiter, je größer die Flugzeuggeschwindigkeit v_F sowie die Flughöhe y_0 und je kleiner der Neigungswinkel (Sturzwinkel) ϑ_0 ist.

Für die Fallzeit T ergibt sich aus Gleichung (199)

$$T = -\frac{v_F}{g} \sin \vartheta_0 + \frac{1}{g} \sqrt{v_F^2 \sin^2 \vartheta_0 + 2 g y_0}\,. \tag{202}$$

Den Spezialfall des horizontalen Bombenabwurfs, also Sturzwinkel $\vartheta_0 = 0$, erhält man aus den Gleichungen (198) bis (202):

Die Fallzeit bestimmt sich aus Gleichung (202) zu

$$T_{\vartheta_0 = 0} = \sqrt{\frac{2 y_0}{g}}, \tag{203}$$

die Wurfweite aus Gleichung (201) zu

$$X_{\vartheta_0=0} = v_F \sqrt{\frac{2\,y_0}{g}} \tag{204}$$

oder, wie es sein muß,

$$X_{\vartheta_0=0} = v_F\, T_{\vartheta_0=0} \tag{205}$$

und die vertikale Endgeschwindigkeit $(v_E)_y$ aus den Gleichungen (199) und (203) zu

$$(v_E)_y = \left(\frac{dy}{dt}\right)_E = \sqrt{2\,g\,y_0}\ . \tag{206}$$

3.4.2. Abwurf im lufterfüllten Raum

Nach Gleichung (198) befindet sich die Bombe im luftleeren Raum immer senkrecht unter dem Flugzeug. Durch den Luftwiderstand wird sie abgebremst und erreicht nicht mehr die Wurfweite X_0 wie im luftleeren Raum, sondern nur noch die Wurfweite X (Bild 324). Außerdem ist zu berücksichtigen, daß wegen der vergrößerten Fallzeit das Flugzeug im Augenblick des Bombenaufschlages sich nicht im Punkt F_0 senkrecht über dem Aufschlagpunkt Z_0 für den luftleeren Raum, sondern im Punkt F_1 befindet. Dadurch vergrößern sich Fallzeit T und Auftreffwinkel ω der Bombe. Ihre Endgeschwindigkeit $(v_E)_y$ ist jetzt nicht nur von ihrer Fallhöhe y_0, sondern auch von ihren aerodynamischen Eigenschaften abhängig. Die Strecke X_R, um die die Bombe hinter dem mit gleicher Geschwindigkeit v_F in gleicher Höhe y_0 weiterfliegenden Flugzeug zurückbleibt, nennt man die Rücktrift, den Winkel δ, unter dem diese Strecke vom Flugzeug aus gesehen wird, den Rücktriftwinkel; er ändert sich mit der Flughöhe y_0 kaum.

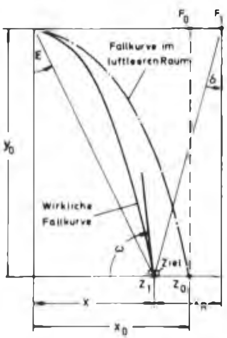


Bild 324. *Bombenabwurf.*

Die Bombe muß abgeworfen werden, wenn sich das Flugzeug in der horizontalen Entfernung X, der Vorhaltestrecke, vor dem Ziel befindet

(Bild 324). Der Vorhaltewinkel ϵ ist demnach der Winkel, den die Ziellinie im Augenblick des Bombenabwurfs mit der Vertikalen bilden muß. Bei konstanter horizontaler Flugzeuggeschwindigkeit $v_{F(\vartheta_0=0)}$ und konstanter Flughöhe y_0 gilt:

$$X + X_R = v_F\ T, \qquad (207)$$

$$\tan \epsilon = \frac{X}{y_0}, \qquad (208)$$

$$\tan \delta = \frac{X_R}{y_0} \qquad (209)$$

und damit
$$\tan \epsilon = \frac{v_F\ T}{y_0} - \tan \delta. \qquad (210)$$

Der Vorhaltewinkel ϵ kann also aus der Flugzeuggeschwindigkeit v_F, der Fallzeit T, der Abwurfhöhe y_0 und dem Rücktriftwinkel δ bestimmt werden. Normalerweise sind zusätzlich unterschiedliche Luftdichte, Windstärke und Windrichtung zu berücksichtigen.

Literatur

[1] Molitz, H.; Strobel, R.: Äußere Ballistik. Berlin 1963.

[2] Schmidt, R.: Praktische Ballistik für den Artilleristen. Berlin 1943.

[3] Kraus, W.: Näherungsformeln, Ungleichungen, Grenzwerte in der äußeren Ballistik. Wehrt. Mh. 45 (1941) S. 186; 47 (1943) S. 235, 299.

[4] Szabó, I.: Höhere Technische Mechanik. Berlin 1964.

[5] Kutterer, R.E.: Ballistik. Braunschweig 1959.

[6] Molitz, H.: Unveröffentlichte Mitteilung nach einer Aufstellung des ehemaligen Waffenamtes des Heeres, Graphik in [1].

[7] Cranz, C.: Lehrbuch der Ballistik, Bd. I. Berlin 1925.

[8] Athen, H.: Ballistik, Heidelberg 1958.

[9] Zurmühl, R.: Praktische Mathematik. Berlin 1965.

[10] Siacci, F.: Riv. d'art. e gen., Bd. I, S. 5, 195, 341 (1896).

[11] Schmidt, R.: Praktische Ballistik. Beiheft 1 der Wehrt. Mh. 1957.

[12] Schmidt, R.: Ein einfaches Verfahren zur angenäherten Darstellung von Flugbahnen. Wehrt. Mh. 42 (1938) S. 159.

[13] Hermann, E.E.: Exterior Ballistics. Annapolis, Maryland (USA) 1935.

[14] Grammel, R.: Der Kreisel, Bd. I, II. Berlin 1950.

[15] Molitz, H.: Der Einfluß eines konstanten Windes auf die Bahn von Geschossen und Raketen. Wehrt. Mh. 57 (1960) S. 258.

[16] Molitz, H.: Der Einfluß des Abkippeffektes auf die Schußweite von Raketen. Wehrt. Mh. 57 (1960) S. 410.

[17] Stutz, W.: Schießlehre. Basel u. Stuttgart 1959.

Ferner:
Curti, P.: Äußere Ballistik. Frauenfeld (Schweiz) 1945.
Hänert, L.: Geschütz und Schuß. Berlin 1940.
McShane, E. J.; Kelley, J.L.; Reno, F.V.: Exterior Ballistics. Denver (USA) 1953.
Sänger, R.: Ballistische Störungstheorie. Basel 1949.
Oerlikon-Taschenbuch. Zürich-Oerlikon (Schweiz) 1956.

4. Abgangsballistik

Die Abgangsballistik befaßt sich mit den Vorgängen, die auf das Geschoß nach Verlassen des Rohres im Bereich der Mündung wirken, und zwar vornehmlich mit dem Einfluß der Rohrschwingungen, aber auch mit dem der besonderen gasdynamischen Verhältnisse in Mündungsnähe. Die Auswirkung dieser Einflüsse wird unter dem Begriff Abgangsfehler zusammengefaßt.

4.1. Der Abgangsfehler

Unter dem Abgangsfehler versteht man den Winkel zwischen einer durch das Geschützrohr gezogenen Bezugslinie vor Abgabe des Schusses und der tatsächlichen Anfangsflugrichtung des Geschosses. Als Bezugslinien können gelten [1]:

die Tangente an die Rohrseele im Bereich der Rohrmündung; sie bestimmt den *ballistischen* Abgangsfehler;

die Verbindung von Mitte Mündung bis Mitte Ladungsraum; das ergibt den *scheinbaren* Abgangsfehler;

die Tangente an die Rohrseele im Bereich des Ladungsraumes; sie ergibt den *tatsächlichen* Abgangsfehler.

Allgemein gebräuchlich ist der *ballistische* Abgangsfehler.

4.1.1. Ursachen des Abgangsfehlers

Bisherige Untersuchungen über den Abgangsfehler haben gezeigt, daß er zum großen Teil von den Rohrbiegeschwingungen während des Abschußvorganges herrührt. Mit Hilfe eines rein optischen – und damit schwingungsfreien – Aufnahmesystems ist nachgewiesen worden, daß das Rohr infolge Anregung durch den Gasdruck bei der Schußentwicklung in hochfrequente Schwingungen versetzt wird. Die beim Geschoßaustritt (das ist der Zeitpunkt, an dem das Führungsband die Mündung verläßt) vorliegende Schwingungsphase wird auf das Geschoß übertragen. Die Rohrschwingung bewirkt also, daß das Geschoß die Mündung unter einem bestimmten, der augenblicklichen Schwingungsphase entsprechenden Winkel (relativ zur ursprünglichen Rohrseelenachse) verläßt. Außerdem wird dem Geschoß eine zur Winkelgeschwindigkeit des Rohres proportionale Quergeschwindigkeit erteilt.

Über das Messen und Registrieren von Rohrbiegeschwingungen wird in Kap. 14, Ballistische und waffentechnische Meßverfahren, unter 14.4.1 berichtet; das dazugehörige Bild 1421 gibt ein Registrierbeispiel einer optischen Winkel- und Wegmessung an einem Waffenrohr wieder.

Ausgelöst werden die Biegeschwingungen des Rohres, wie bereits erwähnt, durch die innenballistischen Vorgänge (Druck der Pulvergase und Geschwindigkeitsverlauf des Geschosses im Rohr). Da zumeist der Schwerpunkt der rücklaufenden Teile und/oder die Schildzapfenachse ober- oder unterhalb der Rohrseelenachse liegen, erzeugt der Gasdruck ein an den rücklaufenden Teilen angreifendes Drehmoment um den Schildzapfen; diesem Drehmoment wirkt die als elastisches Glied aufzufassende Richtmaschine entgegen. Es ergibt sich also ein schwingungsfähiges System, bei dem die Rücklaufbremse, die Vorholer und die Lager als Dämpfungsglieder auftreten. Die Schwingungsfrequenz der rücklaufenden Teile ist im wesentlichen durch die Geometrie und die Materialkonstanten der Richtmaschine und das Trägheitsmoment der rücklaufenden Massen um den Schildzapfen bestimmt. Diese Schwingungen, für deren Berechnung die erregten Massen im Sinne der Elastizitätstheorie als starr angenommen werden, übertragen sich nun auf das elastische Rohr. Die Kopplungsbedingungen zwischen den Freiheitsgraden der in sich als starr angenommenen rücklaufenden Massen und denen des elastischen Rohres, die elastischen Eigenschaften der Richtmaschine und die Eigenfrequenzen des elastischen Rohres bestimmen die resultierende Schwingungsfrequenz des Gesamtsystems und damit auch die des Rohres.

Bei Geschossen mit exzentrischer Schwerpunktslage wird das Rohr infolge der auftretenden Zentrifugalkräfte zu zusätzlichen hochfrequenten Schwingungen angeregt.

Neben den Rohrschwingungen üben auch die nachströmenden Pulvergase einen Einfluß auf den Geschoßabgang aus; ihre Wirkungen scheinen allerdings nach neueren Ergebnissen [2] von untergeordneter Bedeutung zu sein. Eine quantitative Abschätzung dieser gasdynamischen Einflüsse ist allerdings nur mit Hilfe sehr grober Näherungsannahmen möglich.

4.1.2. Ermittlung des Abgangsfehlerwinkels

Die experimentelle Bestimmung des Abgangsfehlerwinkels erfolgt durch Schießen auf eine Anschußscheibe, die in einer Entfernung X vor der Mündung steht. X ist nach *unten* begrenzt, weil bei der Abgangsfehlerermittlung die Geschoßpendelung (Abschnitt 3.2.3.1) weitgehend abgeklungen sein soll; sie ist nach *oben* begrenzt, weil Luftwiderstands-, Drall- und Windeinflüsse weitgehend auszuschalten sind. In Anlehnung an US-amerikanische und französische Gepflogenheiten ist in der Bundesrepublik Deutschland X = 180 m festgelegt worden.

Bei Geschützen, die ggf. durch das Bocken (Abheben des Geschützes vom Boden bei flachen Abgangswinkeln) der Waffe vor dem Geschoßaustritt eine *Parallel*verschiebung der Mündung erfahren, kann mit der Einscheibenmethode ein Fehler in die Messung eingehen, der

sich jedoch nach SIACCI [3] mittels einer Zweischeibenmethode eliminieren läßt.

Literatur

[1] Aberdeen Proving Ground, Maryland (USA): Ordnance Proof Manual, Vol. I, Arms & Ammunition Testing.

[2] Gretler, W.: Zwischenballistische Untersuchungen bei gewöhnlichen flügelstabilisierten Geschossen. DVL Aachen 1966.

[3] Cranz, C.: Lehrbuch der Ballistik, Band I: Äußere Ballistik. Berlin 1925.

5. Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung

5.1. Grundbegriffe

Zunächst seien einige Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung dargelegt, deren Kenntnis für die Schießpraxis, z. B. Treffwahrscheinlichkeit, Verteilungsfunktionen, Stichproben und das Ausreißerproblem, wesentlich ist.

Ereignisse irgendwelcher Art sollen mit A, B, C usw. bezeichnet werden. Es interessiert die Wahrscheinlichkeit P(A) dafür, daß das Ereignis A eintritt; P(A) ist eine Zahl zwischen null und eins:

$$0 \leqslant P(A) \leqslant 1.$$

Das *sichere* Ereignis S hat die Wahrscheinlichkeit $P(S) = 1$, das *unmögliche* Ereignis U die Wahrscheinlichkeit $P(U) = 0$. Die Umkehrung gilt nicht.

A + B ist das Ereignis, bei dem entweder A oder B eintritt; AB ist das Ereignis, bei dem sowohl A als auch B eintritt. Für diese Ereignisse gelten die beiden folgenden grundlegenden Sätze:

Additionstheorem $P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB)$ (1)

Multiplikationstheorem $P(AB) = P(A) \cdot P(B/A) = P(B) \cdot P(A/B)$ (2)

P(B/A) bezeichnet die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von B unter der Bedingung, daß A eingetreten ist.

Für zwei sich ausschließende Ereignisse, das sind zwei Ereignisse, die nicht gleichzeitig eintreten können, ist $P(AB) = 0$. In diesem Fall lautet das Additionstheorem

$$P(A + B) = P(A) + P(B). \quad (3)$$

Unabhängig heißen zwei Ereignisse, wenn

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B); \quad (4)$$

für unabhängige Ereignisse gilt also

$$P(A/B) = P(A)$$

und $$P(B/A) = P(B).$$

Wenn $\bar{A}$ das zu A entgegengesetzte (komplementäre) Ereignis ist, dann ist $(A + \bar{A})$ das sichere Ereignis. Damit ergibt sich aus Gleichungen (1) und (2):

$$P(A+\bar{A}) = P(A) + P(\bar{A}) = P(S) = 1; \quad (5)$$
$$P(A\bar{A}) = P(A) \cdot P(\bar{A}/A) = P(A) \cdot P(U) = 0, \quad (6)$$

da A und $\bar{A}$ einander ausschließen.

5.1.1. Beispiele zu den Grundbegriffen

1) Es sei p die Wahrscheinlichkeit, mit *einem* Schuß ein Ziel zu treffen. Wie groß ist dann die Wahrscheinlichkeit P, mit n Schuß das Ziel mindestens einmal zu treffen?

(1−p) ist die Wahrscheinlichkeit, mit einem Schuß das Ziel nicht zu treffen; $(1-p)^n$ ist die Wahrscheinlichkeit, mit n Schuß das Ziel nicht zu treffen (Anwendung des Multiplikationstheorems). Für die gesuchte Wahrscheinlichkeit P gilt also

$$P = 1 - (1-p)^n. \quad (7)$$

Für P = 0,1 ist z.B., wie aus Bild 501 abgelesen werden kann, die Wahrscheinlichkeit, mit 15 Schuß das Ziel einmal zu treffen, rund 0,8 oder 80 %.

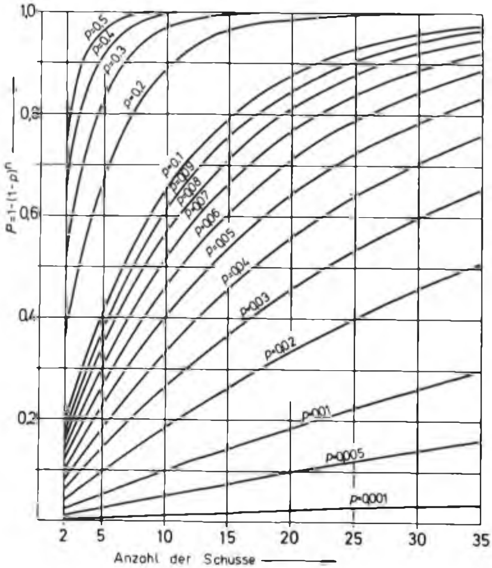


Bild 501. *Exponentielles Vernichtungsgesetz.*

2) Eine andere Anwendung des Additions- und Multiplikationstheorems bietet das Würfelspiel.

P(i) sei die Wahrscheinlichkeit, daß mit einem Wurf die Zahl i gewürfelt wird (i = 1, . . . , 6). Dann gilt bei einem einwandfreien Würfel, d.h., wenn wir die Ereignisse: „die Zahl i wird gewürfelt" als unabhängig voraussetzen

$$P(1) = P(2) = P(3) = P(4) = P(5) = P(6) = 1/6.$$

Es soll die Wahrscheinlichkeit folgender Ereignisse bestimmt werden:

A: Werfen einer 1 oder 2 oder . . . 5 oder 6:
$P(A) = P(1) + P(2) + P(3) + P(4) + P(5) + P(6) = 1.$

B: Werfen einer geraden Zahl:
$P(B) = P(2) + P(4) + P(6) = 1/2.$

C: Werfen einer Zahl größer als 2:
$P(C) = P(3) + P(4) + P(5) + P(6) = 2/3.$

D: Werfen einer geraden Zahl größer als 2:
$P(D) = P(BC) = P(B) \cdot P(C/B) = P(B) \cdot P(C) = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}.$

3) In einer Urne befinden sich 10 numerierte Kugeln. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit p für jede einzelne Kugel, gezogen zu werden?

Nach der Voraussetzung ist $10\,p = 1$, woraus sich ohne weiteres $p = 1/10$ ergibt.

4) In einer Urne befinden sich vier schwarze und fünf weiße Kugeln. Unter der Voraussetzung, daß gezogene Kugeln stets wieder zurückgelegt werden, soll die Wahrscheinlichkeit folgender Ereignisse bestimmt werden:

A: Beim 1. Zug eine weiße Kugel zu ziehen:
$P(A) = 5/9.$

B: Beim 1. Zug eine schwarze Kugel zu ziehen:
$P(B) = 4/9.$

C: Beim 1. Zug eine weiße, beim 2. Zug eine schwarze Kugel zu ziehen (unabhängige Ereignisse):
P(C) = P (beim 1. Zug eine weiße Kugel) · P (beim 2. Zug eine schwarze Kugel) =
$P(A) \cdot P(B) = 5/9 \cdot 4/9 = 20/81.$

D: Beim 1. und 2. Zug je eine weiße Kugel zu ziehen:
$P(D) = P(A) \cdot P(A) = 5/9 \cdot 5/9 = 25/81.$

E: Bei zwei Zügen mindestens eine weiße Kugel zu ziehen:
$P(E) = P(A) + P(A) - P(D) = 5/9 + 5/9 - 25/81 = 65/81;$

oder als Anwendung der Gleichung (7):
$P(E) = 1 - (1 - P(A))^2 = 65/81$.

5.2. Verteilungsfunktionen

5.2.1. Die Normalverteilung

Bei Schießversuchen wird sowohl in horizontaler wie in vertikaler Richtung als Streuungsgesetz die GAUSSsche Normalverteilung vorausgesetzt. Eine Begründung dafür ist, daß die Schießfehlerkomponente in Richtung einer beliebigen Koordinatenachse als Summe einer sehr großen Anzahl einzelner Fehler betrachtet werden kann.

Eine Verteilungsfunktion F(x) gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, daß eine Zufallsgröße X kleiner oder gleich einer Größe x ist:

$$F(x) = P(X \leqslant x).$$

Bei einer stetigen (kontinuierlichen) Verteilung nennt man die Ableitung von F(x), nämlich F'(x), die Dichtefunktion. Als sehr wichtiges Beispiel einer kontinuierlichen Verteilung soll die GAUSSsche Normalverteilung ausführlicher behandelt werden.

Die Dichte der Normalverteilung lautet:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \qquad (8)$$

mit σ = Standardabweichung und μ = Mittelwert.

Siehe dazu Bilder 502 und 503. Die in Bild 503 schraffierte Fläche ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses $(X \leqslant x)$.

Es gilt $$P(X \leqslant x) = \Phi(x) = \int_{-\infty}^{x} \varphi(t)\, dt. \qquad (9)$$

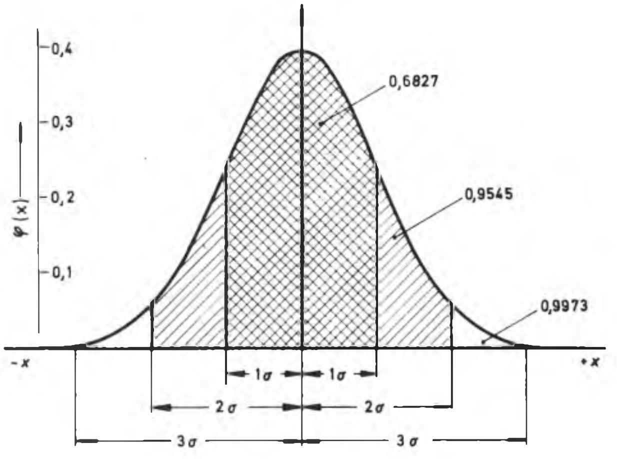


Bild 502. *Dichtefunktionen der Normalverteilung für $\mu = 0$, $\sigma = 1$; ($S(3\sigma) = 0{,}997$, d.h., fast alle Werte liegen innerhalb der 3σ-Grenze).*

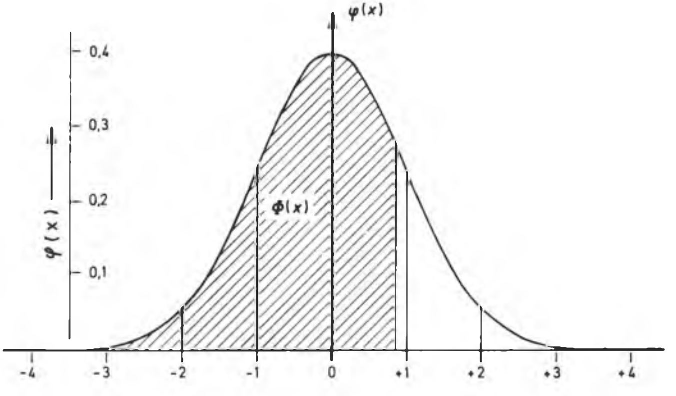


Bild 503. *Verteilungsfunktion: Fläche unter $\varphi(x)$.*

Als statistische Sicherheit definiert man

$$S(x) = P(-x \leqslant X \leqslant x) = \int_{-x}^{x} \varphi(t)\, dt. \qquad (10)$$

Es ist zu beachten, daß die durch Gleichung (8) gegebene Kurve die x-Achse niemals schneidet, ihr aber beliebig nahe kommt. Das bedeutet, daß die GAUSSsche Normalverteilung beliebig große Abweichungen zuläßt. Das ist für praktische Anwendungen unangenehm, da unendlich große Abweichungen nie vorkommen werden.

Nach der unter 5.1 gegebenen Definition der Wahrscheinlichkeit muß für $\varphi(x)$ gelten:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t)\, dt = 1, \qquad (11)$$

denn das Ereignis $E = (-\infty \leqslant X \leqslant \infty)$ hat offenbar die Wahrscheinlichkeit 1. Da nun die Fläche unter der Kurve nach Gleichung (9) (Bild 503) ein Maß für die Wahrscheinlichkeit von E ist, muß für die Dichtefunktion notwendigerweise Gleichung (11) gelten.

Eine Grundgesamtheit (s. 5.3) mit der Dichte nach Gleichung (8) heißt eine normalverteilte Grundgesamtheit mit dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ; man bezeichnet sie mit N (μ,σ) oder auch mit N (μ,σ^2). Wie man dem Bild 502 entnimmt, ist die durch Gleichung (8) gegebene Dichte für $\mu = 0$ symmetrisch zur Ordinate. Weiter erkennt man, daß sich der größte Teil der Abweichungen um den Nullpunkt gruppiert und daß große Abweichungen selten sind. Zum Verlauf der Verteilungsfunktion vgl. Bild 504, zugehörige Tabellenwerte s. Tabelle 500.

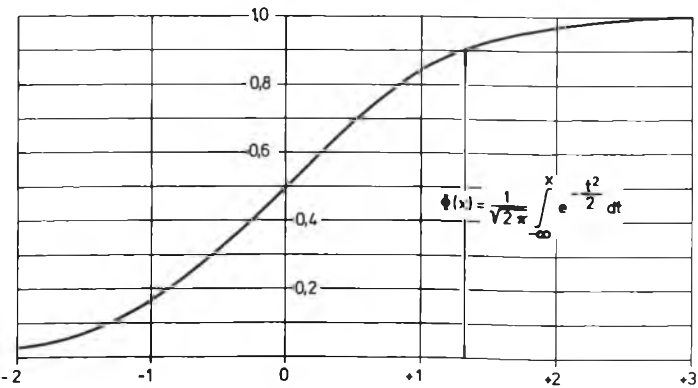
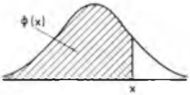
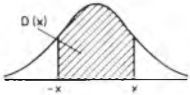


Bild 504. *Verteilungsfunktion der Normalverteilung (μ=0, σ=1).*

Tabelle 500. *Normalverteilung* [1].





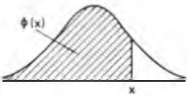
$D(x) = \Phi(x) - \Phi(-x)$

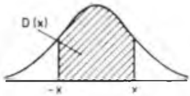
$\Phi(-x) = 1 - \Phi(x)$; $\Phi(0) = 0{,}5$

x	Φ(−x)	Φ(x)	D(x)	x	Φ(−x)	Φ(x)	D(x)	x	Φ(−x)	Φ(x)	D(x)
0,01	0,4960	0,5040	0,0080	0,51	0,3050	0,6950	0,3899	1,01	0,1562	0,8438	0,6875
0,02	0,4920	0,5080	0,0160	0,52	0,3015	0,6985	0,3969	1,02	0,1539	0,8461	0,6923
0,03	0,4880	0,5120	0,0239	0,53	0,2981	0,7019	0,4039	1,03	0,1515	0,8485	0,6970
0,04	0,4840	0,5160	0,0319	0,54	0,2946	0,7054	0,4108	1,04	0,1492	0,8508	0,7017
0,05	0,4801	0,5199	0,0399	0,55	0,2912	0,7088	0,4177	1,05	0,1469	0,8531	0,7063
0,06	0,4761	0,5239	0,0478	0,56	0,2877	0,7123	0,4245	1,06	0,1446	0,8554	0,7109
0,07	0,4721	0,5279	0,0558	0,57	0,2843	0,7157	0,4313	1,07	0,1423	0,8577	0,7154
0,08	0,4681	0,5319	0,0638	0,58	0,2810	0,7190	0,4381	1,08	0,1401	0,8599	0,7199
0,09	0,4641	0,5359	0,0717	0,59	0,2776	0,7224	0,4448	1,09	0,1379	0,8621	0,7243
0,10	0,4602	0,5398	0,0797	0,60	0,2743	0,7257	0,4515	1,10	0,1357	0,8643	0,7287
0,11	0,4562	0,5438	0,0876	0,61	0,2709	0,7291	0,4581	1,11	0,1335	0,8665	0,7330
0,12	0,4522	0,5478	0,0955	0,62	0,2676	0,7324	0,4647	1,12	0,1314	0,8686	0,7373
0,13	0,4483	0,5517	0,1034	0,63	0,2643	0,7357	0,4713	1,13	0,1292	0,8708	0,7415
0,14	0,4443	0,5557	0,1113	0,64	0,2611	0,7389	0,4778	1,14	0,1271	0,8729	0,7457
0,15	0,4404	0,5596	0,1192	0,65	0,2578	0,7422	0,4843	1,15	0,1251	0,8749	0,7499
0,16	0,4364	0,5636	0,1271	0,66	0,2546	0,7454	0,4907	1,16	0,1230	0,8770	0,7540
0,17	0,4325	0,5675	0,1350	0,67	0,2514	0,7486	0,4971	1,17	0,1210	0,8790	0,7580
0,18	0,4286	0,5714	0,1428	0,68	0,2483	0,7517	0,5035	1,18	0,1190	0,8810	0,7620
0,19	0,4247	0,5753	0,1507	0,69	0,2451	0,7549	0,5098	1,19	0,1170	0,8830	0,7660
0,20	0,4207	0,5793	0,1585	0,70	0,2420	0,7580	0,5161	1,20	0,1151	0,8849	0,7699
0,21	0,4168	0,5832	0,1663	0,71	0,2389	0,7611	0,5223	1,21	0,1131	0,8869	0,7737
0,22	0,4129	0,5871	0,1741	0,72	0,2358	0,7642	0,5285	1,22	0,1112	0,8888	0,7775
0,23	0,4090	0,5910	0,1819	0,73	0,2327	0,7673	0,5346	1,23	0,1093	0,8907	0,7813
0,24	0,4052	0,5948	0,1897	0,74	0,2296	0,7704	0,5407	1,24	0,1075	0,8925	0,7850
0,25	0,4013	0,5987	0,1974	0,75	0,2266	0,7734	0,5467	1,25	0,1056	0,8944	0,7887
0,26	0,3974	0,6026	0,2051	0,76	0,2236	0,7764	0,5527	1,26	0,1038	0,8962	0,7923
0,27	0,3936	0,6064	0,2128	0,77	0,2206	0,7794	0,5587	1,27	0,1020	0,8980	0,7959
0,28	0,3897	0,6103	0,2205	0,78	0,2177	0,7823	0,5646	1,28	0,1003	0,8997	0,7995
0,29	0,3859	0,6141	0,2282	0,79	0,2148	0,7852	0,5705	1,29	0,0985	0,9015	0,8029
0,30	0,3821	0,6179	0,2358	0,80	0,2119	0,7881	0,5763	1,30	0,0968	0,9032	0,8064
0,31	0,3783	0,6217	0,2434	0,81	0,2090	0,7910	0,5821	1,31	0,0951	0,9049	0,8098
0,32	0,3745	0,6255	0,2510	0,82	0,2061	0,7939	0,5878	1,32	0,0934	0,9066	0,8132
0,33	0,3707	0,6293	0,2586	0,83	0,2033	0,7967	0,5935	1,33	0,0918	0,9082	0,8165
0,34	0,3669	0,6331	0,2661	0,84	0,2005	0,7995	0,5991	1,34	0,0901	0,9099	0,8198
0,35	0,3632	0,6368	0,2737	0,85	0,1977	0,8023	0,6047	1,35	0,0885	0,9115	0,8230
0,36	0,3594	0,6406	0,2812	0,86	0,1949	0,8051	0,6102	1,36	0,0869	0,9131	0,8262
0,37	0,3557	0,6443	0,2886	0,87	0,1922	0,8078	0,6157	1,37	0,0853	0,9147	0,8293
0,38	0,3520	0,6480	0,2961	0,88	0,1894	0,8106	0,6211	1,38	0,0838	0,9162	0,8324
0,39	0,3483	0,6517	0,3035	0,89	0,1867	0,8133	0,6265	1,39	0,0823	0,9177	0,8355
0,40	0,3446	0,6554	0,3108	0,90	0,1841	0,8159	0,6319	1,40	0,0808	0,9192	0,8385
0,41	0,3409	0,6591	0,3182	0,91	0,1814	0,8186	0,6372	1,41	0,0793	0,9207	0,8415
0,42	0,3372	0,6628	0,3255	0,92	0,1788	0,8212	0,6424	1,42	0,0778	0,9222	0,8444
0,43	0,3336	0,6664	0,3328	0,93	0,1762	0,8238	0,6476	1,43	0,0764	0,9236	0,8473
0,44	0,3300	0,6700	0,3401	0,94	0,1736	0,8264	0,6528	1,44	0,0749	0,9251	0,8501
0,45	0,3264	0,6736	0,3473	0,95	0,1711	0,8289	0,6579	1,45	0,0735	0,9265	0,8529
0,46	0,3228	0,6772	0,3545	0,96	0,1685	0,8315	0,6629	1,46	0,0721	0,9279	0,8557
0,47	0,3192	0,6808	0,3616	0,97	0,1660	0,8340	0,6680	1,47	0,0708	0,9292	0,8584
0,48	0,3156	0,6844	0,3688	0,98	0,1635	0,8365	0,6729	1,48	0,0694	0,9306	0,8611
0,49	0,3121	0,6879	0,3759	0,99	0,1611	0,8389	0,6778	1,49	0,0681	0,9319	0,8638
0,50	0,3085	0,6915	0,3829	1,00	0,1587	0,8413	0,6827	1,50	0,0668	0,9332	0,8664

Fortsetzung S. 188

Tabelle 500. *Normalverteilung* [1]. (Fortsetzung).





$D(x) = \Phi(x) - \Phi(-x)$

$\Phi(-x) = 1 - \Phi(x)$; $\Phi(0) = 0{,}5$

x	Φ(−x)	Φ(x)	D(x)
1,51	0,0655	0,9345	0,8690
1,52	0,0643	0,9357	0,8715
1,53	0,0630	0,9370	0,8740
1,54	0,0618	0,9382	0,8764
1,55	0,0606	0,9394	0,8789
1,56	0,0594	0,9406	0,8812
1,57	0,0582	0,9418	0,8836
1,58	0,0571	0,9429	0,8859
1,59	0,0559	0,9441	0,8882
1,60	0,0548	0,9452	0,8904
1,61	0,0537	0,9463	0,8926
1,62	0,0526	0,9474	0,8948
1,63	0,0516	0,9484	0,8969
1,64	0,0505	0,9495	0,8990
1,65	0,0495	0,9505	0,9011
1,66	0,0485	0,9515	0,9031
1,67	0,0475	0,9525	0,9051
1,68	0,0465	0,9535	0,9070
1,69	0,0455	0,9545	0,9090
1,70	0,0446	0,9554	0,9109
1,71	0,0436	0,9564	0,9127
1,72	0,0427	0,9573	0,9146
1,73	0,0418	0,9582	0,9164
1,74	0,0409	0,9591	0,9181
1,75	0,0401	0,9599	0,9199
1,76	0,0392	0,9608	0,9216
1,77	0,0384	0,9616	0,9233
1,78	0,0375	0,9625	0,9249
1,79	0,0367	0,9633	0,9265
1,80	0,0359	0,9641	0,9281
1,81	0,0351	0,9649	0,9297
1,82	0,0344	0,9656	0,9312
1,83	0,0336	0,9664	0,9328
1,84	0,0329	0,9671	0,9342
1,85	0,0322	0,9678	0,9357
1,86	0,0314	0,9686	0,9371
1,87	0,0307	0,9693	0,9385
1,88	0,0301	0,9699	0,9399
1,89	0,0294	0,9706	0,9412
1,90	0,0287	0,9713	0,9426
1,91	0,0281	0,9719	0,9439
1,92	0,0274	0,9726	0,9451
1,93	0,0268	0,9732	0,9464
1,94	0,0262	0,9738	0,9476
1,95	0,0256	0,9744	0,9488
1,96	0,0250	0,9750	0,9500
1,97	0,0244	0,9756	0,9512
1,98	0,0239	0,9761	0,9523
1,99	0,0233	0,9767	0,9534
2,00	0,0228	0,9772	0,9545

x	Φ(−x)	Φ(x)	D(x)
2,01	0,0222	0,9778	0,9556
2,02	0,0217	0,9783	0,9566
2,03	0,0212	0,9788	0,9576
2,04	0,0207	0,9793	0,9586
2,05	0,0202	0,9798	0,9596
2,06	0,0197	0,9803	0,9606
2,07	0,0192	0,9808	0,9615
2,08	0,0188	0,9812	0,9625
2,09	0,0183	0,9817	0,9634
2,10	0,0179	0,9821	0,9643
2,11	0,0174	0,9826	0,9651
2,12	0,0170	0,9830	0,9660
2,13	0,0166	0,9834	0,9668
2,14	0,0162	0,9838	0,9676
2,15	0,0158	0,9842	0,9684
2,16	0,0154	0,9846	0,9692
2,17	0,0150	0,9850	0,9700
2,18	0,0146	0,9854	0,9707
2,19	0,0143	0,9857	0,9715
2,20	0,0139	0,9861	0,9722
2,21	0,0136	0,9864	0,9729
2,22	0,0132	0,9868	0,9736
2,23	0,0129	0,9871	0,9743
2,24	0,0125	0,9875	0,9749
2,25	0,0122	0,9878	0,9756
2,26	0,0119	0,9881	0,9762
2,27	0,0116	0,9884	0,9768
2,28	0,0113	0,9887	0,9774
2,29	0,0110	0,9890	0,9780
2,30	0,0107	0,9893	0,9786
2,31	0,0104	0,9896	0,9791
2,32	0,0102	0,9898	0,9797
2,33	0,0099	0,9901	0,9802
2,34	0,0096	0,9904	0,9807
2,35	0,0094	0,9906	0,9812
2,36	0,0091	0,9909	0,9817
2,37	0,0089	0,9911	0,9822
2,38	0,0087	0,9913	0,9827
2,39	0,0084	0,9916	0,9832
2,40	0,0082	0,9918	0,9836
2,41	0,0080	0,9920	0,9840
2,42	0,0078	0,9922	0,9845
2,43	0,0075	0,9925	0,9849
2,44	0,0073	0,9927	0,9853
2,45	0,0071	0,9929	0,9857
2,46	0,0069	0,9931	0,9861
2,47	0,0068	0,9932	0,9865
2,48	0,0066	0,9934	0,9869
2,49	0,0064	0,9936	0,9872
2,50	0,0062	0,9938	0,9876

x	Φ(−x)	Φ(x)	D(x)
2,51	0,0060	0,9940	0,9879
2,52	0,0059	0,9941	0,9883
2,53	0,0057	0,9943	0,9886
2,54	0,0055	0,9945	0,9889
2,55	0,0054	0,9946	0,9892
2,56	0,0052	0,9948	0,9895
2,57	0,0051	0,9949	0,9898
2,58	0,0049	0,9951	0,9901
2,59	0,0048	0,9952	0,9904
2,60	0,0047	0,9953	0,9907
2,61	0,0045	0,9955	0,9909
2,62	0,0044	0,9956	0,9912
2,63	0,0043	0,9957	0,9915
2,64	0,0041	0,9959	0,9917
2,65	0,0040	0,9960	0,9920
2,66	0,0039	0,9961	0,9922
2,67	0,0038	0,9962	0,9924
2,68	0,0037	0,9963	0,9926
2,69	0,0036	0,9964	0,9929
2,70	0,0035	0,9965	0,9931
2,71	0,0034	0,9966	0,9933
2,72	0,0033	0,9967	0,9935
2,73	0,0032	0,9968	0,9937
2,74	0,0031	0,9969	0,9939
2,75	0,0030	0,9970	0,9940
2,76	0,0029	0,9971	0,9942
2,77	0,0028	0,9972	0,9944
2,78	0,0027	0,9973	0,9946
2,79	0,0026	0,9974	0,9947
2,80	0,0026	0,9974	0,9949
2,81	0,0025	0,9975	0,9950
2,82	0,0024	0,9976	0,9952
2,83	0,0023	0,9977	0,9953
2,84	0,0023	0,9977	0,9955
2,85	0,0022	0,9978	0,9956
2,86	0,0021	0,9979	0,9958
2,87	0,0021	0,9979	0,9959
2,88	0,0020	0,9980	0,9960
2,89	0,0019	0,9981	0,9961
2,90	0,0019	0,9981	0,9963
2,91	0,0018	0,9982	0,9964
2,92	0,0018	0,9982	0,9965
2,93	0,0017	0,9983	0,9966
2,94	0,0016	0,9984	0,9967
2,95	0,0016	0,9984	0,9968
2,96	0,0015	0,9985	0,9969
2,97	0,0015	0,9985	0,9970
2,98	0,0014	0,9986	0,9971
2,99	0,0014	0,9986	0,9972
3,00	0,0013	0,9987	0,9973

Es seien noch kurz folgende Definitionen gegeben:
Der Mittelwert (Erwartungswert) μ einer Zufallsvariablen X ist definiert durch

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x)\, dx,$$

wobei f(x) die Dichtefunktion ist.

Die Varianz σ^2 ist definiert durch

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x-\mu)^2 f(x)\, dx.$$

Die positive Wurzel aus der Varianz ist die Standardabweichung σ.

5.2.2. Die Binomialverteilung

Die Binomialverteilung ist ein häufig auftretendes Beispiel einer diskreten Verteilung. Es werden n Versuche gemacht. Das Ergebnis jedes Versuches soll ein Ereignis A mit der Wahrscheinlichkeit $P(A) = p$ oder das jeweils komplementäre Ereignis $\bar{A}$ mit der Wahrscheinlichkeit $P(\bar{A}) = q$ sein. Es gilt also $p + q = 1$.

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, daß bei n Versuchen k-mal das Ereignis A und (n–k)mal das Ereignis $\bar{A}$ eintritt?

Die Wahrscheinlichkeit, daß in k Fällen das Ereignis A und in den übrigen Fällen $\bar{A}$ eintritt, ist nach dem Multiplikationstheorem

$$p^k q^{n-k} = p^k (1-p)^{n-k}.$$

Bei n Versuchen gibt es $\binom{n}{k}$ derartige Möglichkeiten. Damit ergibt sich die gesuchte Wahrscheinlichkeit zu

$$p(n, k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}.$$

Die Verteilungsfunktion F(x) der Binomialverteilung lautet somit

$$F(x) = P(X \leqslant x) = \sum_{k \leqslant x} \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k},$$

wobei X die Anzahl der in einer Reihe von n Versuchen mit der Wahrscheinlichkeit p eintretenden Ereignisse ist.

Einige Anwendungen der Binomialverteilung bringt der Abschnitt 5.4.

5.3. Stichprobe und Stichprobenparameter

In der *Statistik* nennt man eine beliebige Menge, deren Elemente jeweils Gegenstand statistischer Untersuchungen sind, eine *Grundgesamtheit* oder kurz *Gesamtheit*. So sind z.B. die unendliche Anzahl von Würfelversuchen oder von Beschüssen eine Grundgesamtheit. Die Elemente selbst können hinsichtlich verschiedener Merkmale untersucht werden.

Als Stichprobe bezeichnet man eine endliche Teilmenge aus einer Gesamtheit. Die Anzahl n der Elemente der betreffenden Teilmenge heißt Umfang der Stichprobe. So bilden zum Beispiel m Schießversuche eine Stichprobe vom Umfang m. Da die im allgemeinen unendliche Menge der Elemente der Grundgesamtheit nicht überschaubar ist, d.h., da man irgendwelche Eigenschaften sämtlicher Elemente nicht messend erfassen kann, versucht man, aus den Eigenschaften der Elemente einer Stichprobe auf die Eigenschaften der Elemente der Gesamtheit zu schließen. In 5.2.1 treten schon die Begriffe Mittelwert μ und Standardabweichung σ auf. Analog zu diesen in sehr vielen Fällen unbekannten Parametern der Grundgesamtheit definiert man für eine Stichprobe ebenfalls den Mittelwert $\bar{x}$ und die Standardabweichung s.

$x_1, x_2, \ldots, x_n$ seien die Meßergebnisse irgendeiner Eigenschaft von n Elementen einer Grundgesamtheit (die Meßergebnisse x_i bilden also eine Stichprobe vom Umfang n). Unter dem *Mittelwert* der Stichprobe versteht man dann das arithmetische Mittel

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i.$$

Beispiel:
Es möge eine Stichprobe mit folgenden 10 (gemessenen) Werten vorliegen:

$$x_1 = 10,\ x_2 = 9,\ x_3 = 15,\ x_4 = 12,\ x_5 = 11,$$
$$x_6 = 9,\ x_7 = 14,\ x_8 = 13,\ x_9 = 12,\ x_{10} = 15.$$

Damit ergibt sich

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = \frac{1}{10} \cdot 120 = 12.$$

Als *Stichprobenvarianz* definiert man

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2$$

und damit

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}\,.$$

Auf das obige Beispiel angewandt, erhält man

$$s^2 = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \overline{x})^2 = \frac{1}{9} \cdot 46 = 5{,}1,$$

und für s ergibt sich folglich

$$s = \sqrt{5{,}1} = 2{,}3.$$

Für die Praxis sehr wichtig ist der Begriff der *wahrscheinlichen Abweichung w;* sie ist bei zugrunde gelegter Normalverteilung definiert durch

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\mu-w}^{\mu+w} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx = 0{,}5.$$

Die Größe 2 w nennt man die 50 %ige Streuung.

Unter der *durchschnittlichen Abweichung* versteht man das arithmetische Mittel aller absolut genommenen Abweichungen:

$$E = \frac{|x_1 - \overline{x}| + |x_2 - \overline{x}| + \cdots + |x_n - \overline{x}|}{n}\,.$$

Tabellarische Zusammenfassung der für die Praxis wichtigen Beziehungen

Mittelwert $\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$

Varianz $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2$

Standardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}$$

50%ige Streuung (2w) = 1,3490 s

Durchschnittliche Abweichung

$$E = \frac{|x_1 - \bar{x}| + |x_2 - \bar{x}| + \cdots + |x_n - \bar{x}|}{n}$$

Tabelle 501. *Umrechnungskoeffizienten.*

	E	s	w
Durchschnittliche Abweichung E	1	0,7978846	1,1829372
Standardabweichung s	1,2533141	1	1,4826021
Wahrscheinliche Abweichung w (probable error)	0,8453476	0,6744898	1

Beispiel: s = 1,2533141 E

Tabelle 502. *Wahrscheinlichkeiten für die Lage der Variablen im Bereich $\mu - a \ldots \mu + a$ bei Normalverteilung.*

P	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	95 %	99 %	99,9%
a/s	0,6745	0,8416	1,0364	1,2816	1,6449	1,9600	2,5758	3,2905
a/w	1,0000	1,2478	1,5366	1,9001	2,4387	2,9059	3,8189	4,8785

Beispiel 1: w = 2. Wo liegen 80% der Werte?
Aus der Tabelle 502 folgt a/2 = 1,9001, a = 3,8002
Antwort: In $[\mu - 3{,}8002,\ \mu + 3{,}8002]$.

Beispiel 2: w = 2.Wieviel der Werte liegen in $[\mu - 4,\ \mu + 4]$?
Antwort: 82,27% der Werte.

Gesamtstreuung

Unter der Gesamtstreuung oder auch Spannweite einer Meßreihe versteht man die Differenz der am weitesten auseinanderliegenden Werte.

100%ige Streuung

Bei der Normalverteilung versteht man unter der 100%igen Streuung die ganze reelle Achse.

5.4. Ballistische Anwendungen

5.4.1. Treffwahrscheinlichkeit

a) Die Wahrscheinlichkeit, mit einem Einzelschuß bei einem Zielfehler μ_X, μ_Y, einer ballistischen Streuung σ_X, σ_Y und einem Korrelationskoeffizienten ρ der Ablagen X und Y nach Seite und Höhe ein Rechteck $a \leqslant x \leqslant b$, $c \leqslant y \leqslant d$ zu treffen, ist nach 5.2.1

$$p_H = \int_{x=a}^{b} \int_{y=c}^{d} \varphi(x, y)\, dx\, dy \qquad (12)$$

mit der Dichtefunktion

$$\varphi(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_X\sigma_Y\sqrt{1-\rho^2}}\, e^{-E(x,y)}, \qquad (13)$$

$$\text{wobei } E(x,y) = \frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{(x-\mu_X)^2}{\sigma_X^2} - \frac{2\rho(x-\mu_X)(y-\mu_Y)}{\sigma_X\sigma_Y} + \frac{(y-\mu_Y)^2}{\sigma_Y^2}\right].$$

Bei Unabhängigkeit von X und Y ergibt sich mit

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{t^2}{2}}\, dt$$

$$p_H = \left[\Phi\left(\frac{b-\mu_X}{\sigma_X}\right) - \Phi\left(\frac{a-\mu_X}{\sigma_X}\right)\right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{d-\mu_Y}{\sigma_Y}\right) - \Phi\left(\frac{c-\mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right] \qquad (14)$$

b) Liegt der mittlere Treffpunkt der Schüsse in der Mitte des Zieles, so läßt sich p_H sehr leicht aus der 50%igen Streuung mit Hilfe der „relativen Zielausdehnung" nach Länge und Breite (oder nach Höhe und Breite) ermitteln (Bild 505).

Die *relative Zielausdehnung* ist das Verhältnis der Zielausdehnung in der betreffenden Richtung zur entsprechenden 50%igen Streuung. Aus Bild 505 kann die zu einer relativen Zielausdehnung gehörige Treffwahrscheinlichkeit entnommen werden; diese gilt für einen in einer Richtung unbegrenzten Streifen von der Breite des Zieles. Aus dem Multiplikationstheorem (vgl. 5.1) ergibt sich dann p_H für die Zielfläche.

Beispiel: Das Ziel habe eine Breite von 20 m und eine Höhe von 10 m. Wie groß ist die Treffwahrscheinlichkeit, wenn nach der zugehörigen Schußtafel die 50%ige Streuung nach der Seite 8,5 m und nach der Höhe 33 m betrage?

Lösung: Es ergibt sich die relative Breitenausdehnung zu 20:8,5 = 2,35, die relative Höhenausdehnung zu 10:33 = 0,3. Aus Bild 505 ergibt sich damit die Treffwahrscheinlichkeit des Zieles in der Breite von 0,88, in der Höhe von 0,16. Aus dem Multiplikationstheorem erhält man $p_H = 0{,}16 \cdot 0{,}88 \approx 0{,}14$ oder 14 %.

c) Für eine kreisförmige Zielfläche (Radius R) und kreisförmige Standardabweichung $\sigma = \sigma_X = \sigma_Y$ ist bei Unabhängigkeit von X und Y die Verteilungsdichte nach Gleichung (13) gegeben durch

$$\varphi(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2}\, e^{-\frac{1}{2\sigma^2}\left[(x-\mu_X)^2 + (y-\mu_Y)^2\right]} \qquad (15)$$

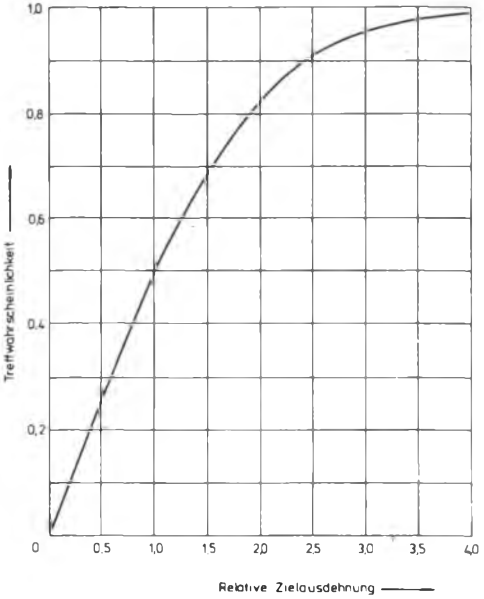


Bild 505. *Treffwahrscheinlichkeit eines in einer Richtung un. grenzten Streifens von der Breite des Zieles.*

Durch Einführen von Polarkoordinaten R, α, und zwar

$$x = \mu_X + R\cos\alpha,\ y = \mu_Y + R\sin\alpha,$$

geht φ (x, y) über in

$$\varphi(R) = \frac{R}{\sigma^2}\, e^{-\frac{R^2}{2\sigma^2}}. \qquad (1$$

Damit ergibt sich unter der Annahme, daß mittlerer Treffpunkt u Zielmittelpunkt zusammenfallen, für die Treffwahrscheinlichkeit v Kreisflächen

$$P_H = 1 - e^{-\frac{R^2}{2\sigma^2}}. \qquad (1$$

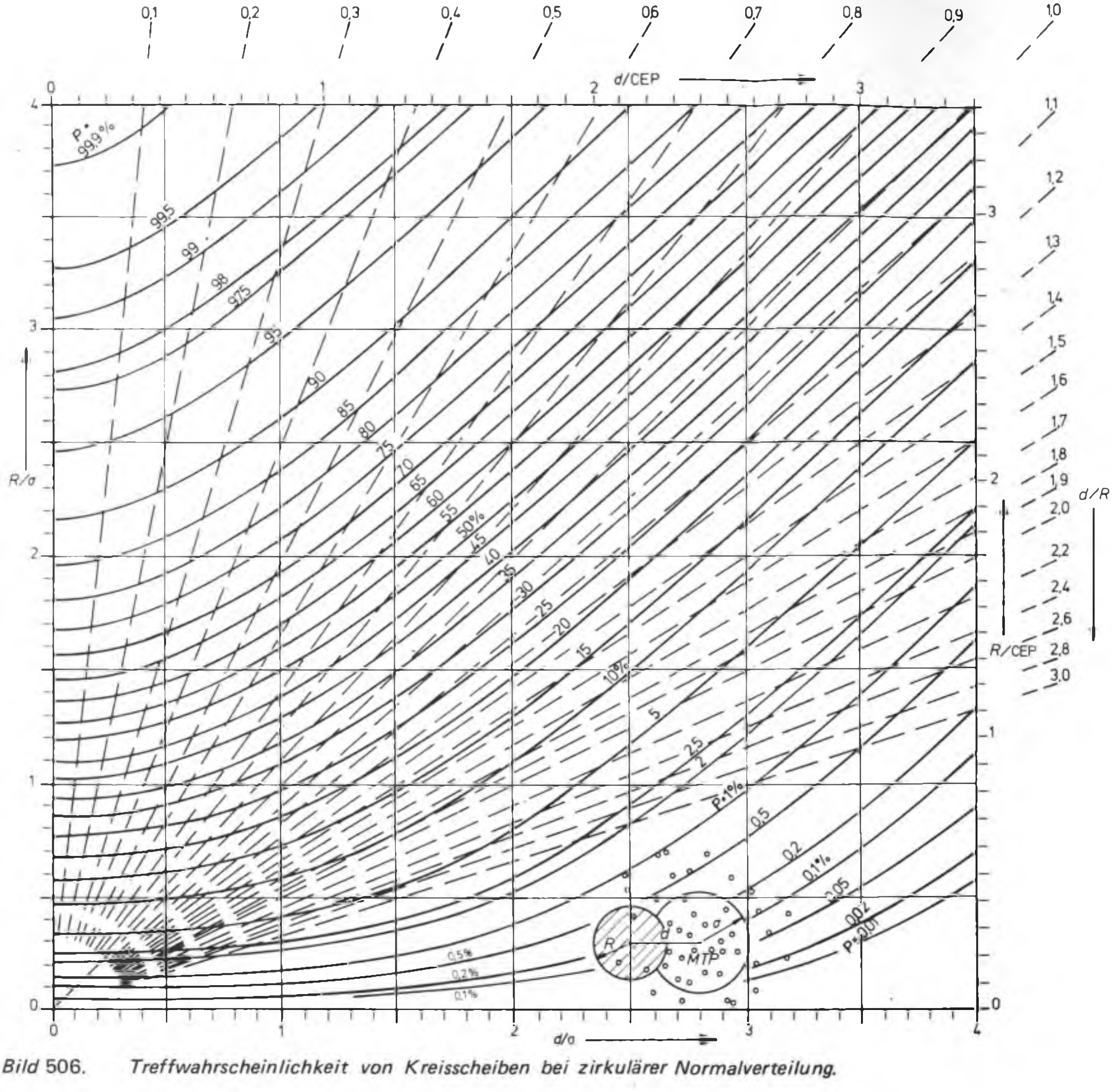


Bild 506. *Treffwahrscheinlichkeit von Kreisscheiben bei zirkulärer Normalverteilung.*

Der Radius des Kreises, der 50 % der Treffer enthält, ist der wahrscheinliche radiale Fehler CEP (circular error probable) und gegeben durch $p_H = 1/2$:

$$CEP = \sqrt{2 \cdot \ln 2}\ \sigma = 1{,}17741\ \sigma. \qquad (18)$$

d) Haben Kreismittelpunkt und mittlerer Treffpunkt den Abstand d, so lassen sich die Treffwahrscheinlichkeitswerte aus dem Diagramm Bild 506 ablesen [2].

Für $d/R > 1$ gibt es für ein gegebenes d eine optimale Streuung.

5.4.2. Zerstörungswahrscheinlichkeit

a) Um die Wahrscheinlichkeit zu ermitteln, mit der ein Ziel vernichtet wird, hat man die Zerstörungswahrscheinlichkeit Q(k) von k Treffern zu bestimmen:

$$Q(0) = 0,\ Q(\infty) = 1,\ Q(k+1) \geqslant Q(k). \qquad (19)$$

Die im Mittel zur Vernichtung notwendige Trefferzahl ist

$$\bar{k} = \sum_{\nu=0}^{\infty} (1 - Q(\nu)). \qquad (20)$$

Beispiel: Flugzeugzerstörung

Das Flugzeug sei in drei verschieden empfindliche Teile eingeteilt, nämlich
A Kabine und Triebwerk,
B Kraftstoffbehälter und
C Sonstiges.

Zur Vernichtung des Flugzeuges sollen ein Treffer in A bzw. zwei Treffer in B bzw. drei Treffer in C genügen. Teil A beansprucht 30 %, Teil B 20 % und Teil C 50 % der Gesamtfläche.

$$Q(1) = 0{,}3,$$
$$Q(2) = 1 - (1 - 0{,}3)^2 + 0{,}04 = 0{,}55.$$

Das Ziel wird durch drei Treffer nur dann nicht vernichtet, wenn zwei Geschosse in Teil C und ein Geschoß in Teil B treffen. Da sich drei verschiedene Kombinationen dafür aufstellen lassen, ist die Wahrscheinlichkeit der Nichtvernichtung des Flugzeugs bei drei Treffern $3 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}5^2$.

Damit ergibt sich

$$Q(3) = 1 - 3 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}5^2 = 0{,}85;$$

$$Q(k) = 1, \; k \geqslant 4.$$

Die im Mittel notwendige Trefferzahl ist damit

$$\overline{k} = 1 + 0{,}7 + 0{,}45 + 0{,}15 = 2{,}3.$$

b) Bei fehlender Schadenshäufung ist

$$Q(1) = p_{K|H}, \tag{21}$$

$$Q(k) = 1 - (1 - p_{K|H})^k, \tag{22}$$

$$\overline{k} = \frac{1}{p_{K|H}}. \tag{23}$$

Die Zerstörungswahrscheinlichkeit $p_{K|H}$ läßt sich als Funktion der Geschoßenergie E berechnen nach

$$p_{K|H} = 1 - e^{-\frac{E}{E_0}} \tag{24}$$

oder

$$p_{K|H} = 1 - e^{-\left(\frac{E}{E_1}\right)^\lambda} \tag{25}$$

mit $\lambda > 1$ (s. Bild 507 und 508).

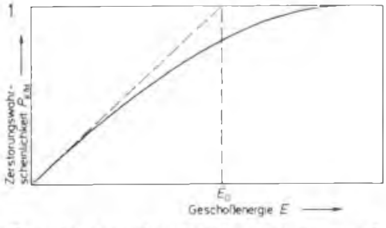


Bild 507. *Zerstörungswahrscheinlichkeit* $p_{K|H} = 1 - e^{-\frac{E}{E_0}}$

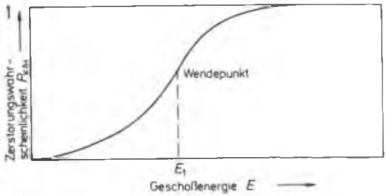


Bild 508. *Zerstörungswahrscheinlichkeit* $p_{K|H} = 1 - e^{-\left(\frac{E}{E_1}\right)^{\lambda}}$.

5.4.3. Abschußwahrscheinlichkeit

a) Die Abschußwahrscheinlichkeit eines Einzelschusses mit der Treffwahrscheinlichkeit p_H und der Zerstörungswahrscheinlichkeit $p_{K|H}$ beträgt

$$p_K = p_H \cdot p_{K|H}. \tag{26}$$

b) Ist $p(n,\nu)$ die Wahrscheinlichkeit, daß von n Schüssen genau ν Treffer sind, und $Q(\nu)$ die Wahrscheinlichkeit, daß ν Treffer zerstören, so ist allgemein die Abschußwahrscheinlichkeit

$$p_K(n) = \sum_{\nu=0}^{n} p(n,\nu) \cdot Q(\nu). \tag{27}$$

c) Bei fehlender Schadenshäufung ist also

$$p_K(n) = \sum_{\nu=0}^{n} \binom{n}{\nu} p_H^{\nu} (1 - p_H)^{n-\nu} (1 - (1 - p_{K|H})^{\nu}) \tag{28}$$

$$= 1 - \sum_{\nu=0}^{n} \binom{n}{\nu} p_H^{\nu} (1 - p_{K|H})^{\nu} (1 - p_H)^{n-\nu}$$

$$= 1 - (p_H (1 - p_{K|H}) + 1 - p_H)^n$$

$$= 1 - (1 - p_H \cdot p_{K|H})^n = 1 - (1 - p_K)^n.$$

Bei kleinen Abschußwahrscheinlichkeiten p_K ist

$$p_K(n) = 1 - e^{-n \cdot p_K} = 1 - e^{-n \cdot p_H \cdot p_{K|H}}. \tag{29}$$

Beispiel:

1) Angenommen, es sei $p_H = 0{,}15$, $k = 3$;
   dann gilt $p_{K|H} = 0{,}33$, $p_K = 0{,}05$;

   bei 10 Schuß beträgt die Abschußwahrscheinlichkeit

$$p_K(10) = 1 - (1 - 0{,}05)^{10} = 0{,}40.$$

2) Um bei gleichen Voraussetzungen wie bei 1) eine Abschußwahrscheinlichkeit von 0,9 zu erzielen, braucht man nach

$$n = \frac{\ln(1 - p_K(n))}{\ln(1 - p_K)} \tag{30}$$

   45 Schuß.

5.4.4. Munitionsbedarf

Im folgenden soll für eine vorgegebene Einzelschuß-Treffwahrscheinlichkeit p_H die zur totalen Erledigung einer Schießaufgabe im Mittel erforderliche Munitionsmenge bestimmt werden; d.h.: der Beschuß soll so lange fortgesetzt werden, bis das Ziel funktionsunfähig ist. Je nach der taktischen Lage kann dies verschiedenes bedeuten.

Erstens: Das Ziel soll durch *einen* Treffer vernichtet werden.

a) Es sei vorausgesetzt, daß die Geschosse das Ziel unabhängig voneinander vernichten (fehlende Anhäufung des Schadens). Man erhält die erforderliche Schußzahl n zu

$$n = \frac{1}{p_H} . \tag{31}$$

Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Schüsse einzeln abgegeben werden.

b) Gibt man die Schüsse in N Gruppen von je s Schüssen ab (aus einem oder mehreren Geschützen), so ergibt sich die erforderliche Schußzahl aus folgender Überlegung: Nach Gleichung (7) gilt für die Wahrscheinlichkeit P, daß von den s Schüssen mindestens einer das Ziel trifft (Erfüllung der Schießaufgabe):

$$P = 1 - (1 - p_H)^s. \tag{32}$$

Für die Anzahl N der Schußgruppen folgt:

$$N = \frac{1}{P} = \frac{1}{1 - (1 - p_H)^s} . \tag{33}$$

Da jede Gruppe aus s Schüssen besteht, erhalten wir den Munitionsbedarf

$$n = N \cdot s = \frac{s}{1 - (1 - p_H)^s} \,. \tag{34}$$

Die Tabelle 503 enthält den nach Gleichung (34) errechneten, auf ganze Zahlen aufgerundeten Munitionsbedarf n für einige Werte von p_H und s.

Tabelle 503. *Munitionsbedarf n für einige Werte von p_H und s.*

s	p_H				
	0,001	0,01	0,1	0,5	1
	n				
1	1000	100	10	2	1
5	1002	103	13	6	5
10	1005	105	16	11	10
20	1010	110	23	20	20

Für s = 1 ergibt die Tabelle den Sonderfall des Einzelschießens nach Gleichung (31); für $p_H = 1$ stimmt die Schußzahl n mit s überein. Der Einfluß der Schußzahl s einer Gruppe auf den erforderlichen Munitionsbedarf wird um so geringer, je kleiner P, je größer aber die erforderliche Schußzahl n selbst wird.

Zweitens: Es liege eine Anhäufung des Schadens vor, d.h., es seien mehrere Treffer, und zwar z Treffer zur Erledigung der Schießaufgabe erforderlich.

a) Bei Einzelbeschuß erhält man nach Gleichung (31) als Munitionsbedarf (p_H wie vorher):

$$n = \frac{z}{p_H} \,. \tag{35}$$

b) Beim Gruppenschießen ergeben sich die im Mittel erforderlichen Gruppen- und Schußzahlen aus folgender Überlegung: Damit der k-te Schuß der z-te Treffer sei, ist es erforderlich, daß erstens der k-te Schuß ein Treffer ist und daß zweitens von den (k–1) vorhergehenden Schüssen (z–1) Treffer sind.

Nach 5.2.2 ist die Wahrscheinlichkeit P' dafür, daß die ersten (k–1) Schüsse genau (z–1) Treffer enthalten:

$$P' = \binom{k-1}{z-1} p_H^{z-1} (1 - p_H)^{k-z}, \tag{36}$$

falls p_H die Treffwahrscheinlichkeit jedes Schusses ist. Nach dem Multiplikationstheorem gilt für die Wahrscheinlichkeit, daß sowohl der k-te Schuß ein Treffer ist als auch die ersten (k−1) Schüsse (z−1) Treffer enthalten:

$$P_0 = p_H \cdot P' = \binom{k-1}{z-1} p_H^z \, (1 - p_H)^{k-z} . \qquad (37)$$

Für die Wahrscheinlichkeit P_1, daß die z Treffer in die erste Gruppe von s Schüssen fallen, erhält man nach dem Additionstheorem

$$P_1 = \sum_{k=z}^{k=s} P_0 . \qquad (38)$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß der z-te Treffer in die zweite Gruppe von s Schüssen fällt, ist

$$P_2 = \sum_{k=s+1}^{2s} P_0 \qquad (39)$$

usw. Entsprechend erhält man die Wahrscheinlichkeit für die Notwendigkeit von z.B. drei Gruppen als

$$P_3 = \sum_{k=2s+1}^{3s} P_0 . \qquad (40)$$

Bisher wurde vorausgesetzt, daß $z \leqslant s$ ist, d.h., daß die z Treffer alle in eine Gruppe, z.B. die erste, fallen können. Gilt $s \leqslant z \leqslant 2s$, so ist $P_1 = 0$, und P_2 ist für $k = z$ bis $k = 2s$ zu summieren usw.

Zur Erledigung von r gleichen Schießaufgaben sind also $P_1 \cdot r \cdot s + P_2 \cdot r \cdot 2s + \ldots$ Schüsse notwendig; im Durchschnitt für jede der r Schießaufgaben somit

$$n = \frac{P_1 \cdot r \cdot s + P_2 \cdot r \cdot 2s + P_3 \cdot r \cdot 3s + \ldots}{r},$$

d.h.

$$n = (P_1 + 2P_2 + 3P_3 + \ldots)s. \qquad (41)$$

Anmerkungen

a) Ist es nicht möglich oder nicht beabsichtigt, das Schießen bis zur Erledigung der Schießaufgabe fortzusetzen, so muß der Munitionsbedarf anders bestimmt werden. Es wird lediglich, wie beim Anflug eines Luftzieles, eine Gruppe von s Schüssen gleichzeitig und nacheinander abgegeben. Dann hat es keinen Sinn zu fragen, wie groß n sein muß, damit mindestens ein Treffer erzielt werde.

Die Frage kann dann nur lauten: Wieviel Schüsse sind erforderlich, um eine bestimmte Wahrscheinlichkeit für das Eintreten z.B. mindestens eines Treffers zu haben. Ist die Treffwahrscheinlichkeit eines jeden

Schusses p_H, so ist nach Gleichung (7) die Wahrscheinlichkeit, mit n Schüssen mindestens einen Treffer zu erzielen:

$$P = 1 - (1 - p_H)^n \; . \tag{42}$$

Gibt man P vor, so erhält man n durch Logarithmieren:

$$\boxed{n = \frac{\ln(1 - P)}{\ln(1 - p_H)} \; .} \tag{43}$$

Gleichung (43) ist die grundlegende Formel zur Errechnung der erforderlichen Schußzahl.

b) Bei der Wahl von P werden die verschiedensten Umstände mitsprechen müssen, nämlich Wichtigkeit des zu zerstörenden Objektes, augenblickliche Stärke der Abwehr, Munitionsbedarf usw. Im allgemeinen wird man P = 0,5 als unterste Grenze annehmen, also den Fall, daß man mit 1:1 für den Erfolg wetten kann.

Die Tabelle 504 enthält für verschiedene Werte von P und p_H die erforderliche (aufgerundete) Schußzahl nach Gleichung (43).

Tabelle 504. *Notwendige Schußzahl n zur Erzielung eines Treffers in Abhängigkeit von der Treffwahrscheinlichkeit p_H und der Wahrscheinlichkeit P.*

P	p_H			
	0,001	0,01	0,1	0,5
	n			
0,5	693	69	7	1
0,6	916	91	9	2
0,7	1203	120	12	2
0,8	1609	160	16	3
0,9	2301	229	22	4
0,95	2994	298	29	5
0,99	4603	458	44	7

Ist in den Gleichungen (31) und (43) n gleich, so kann man aus beiden Formeln die Gesamtwahrscheinlichkeit P dafür errechnen, daß die im Durchschnitt erforderliche Schußzahl mindestens einen Treffer enthält. Unter obiger Voraussetzung gilt die Beziehung

$$\frac{1}{p_H} = \frac{\ln(1 - P)}{\ln(1 - p_H)} \; ; \tag{44}$$

durch Auflösen folgt

$$P = 1 - (1 - p_H)^{1/p_H}. \tag{45}$$

Für kleines p_H gilt

$$\ln (1 - p_H) \approx -p_H$$

und damit

$$\frac{1}{p_H} \approx \frac{\ln (1 - P)}{-p_H} .$$

angenähert erhält man

$$P \approx 1 - e^{-1} = 0{,}632. \tag{46}$$

Genügt also zur Erledigung einer Schießaufgabe *ein* Treffer, so enthält die im Durchschnitt benötigte Munitionsmenge mit der Wahrscheinlichkeit 0,632 mindestens einen Treffer.

Im folgenden soll die erforderliche Schußzahl betrachtet werden, falls für einen Erfolg mindestens z Treffer nötig sind.

Nach 5.2.2 ist

$$\sum_{k=0}^{z-1} \binom{n}{k} p_H^k (1 - p_H)^{n-k}$$

die Wahrscheinlichkeit dafür, daß von n Schüssen weniger als z treffen. Wenn P die Wahrscheinlichkeit dafür ist, daß von n Geschossen mindestens z treffen, so gilt

$$1 - P = \sum_{k=0}^{z-1} \binom{n}{k} p_H^k (1 - p_H)^{n-k}. \tag{47}$$

Bei vorgegebenem P bestimmt sich hieraus die erforderliche Schußzahl n.

c) Einige Bemerkungen zur Gleichung (43):

Die Gleichung ist nur dann richtig, wenn man von einer gegnerischen Gegenwirkung und etwaigen Zuverlässigkeitsmängeln des eigenen Waffensystems absieht. In der Praxis sind diese Faktoren jedoch von Bedeutung. Man hilft sich, indem man die Wahrscheinlichkeit P angibt, mit welcher ein Schuß abgefeuert werden kann. Die Formel $P = 1 - (1-p_H)^n$ (Exponentialvernichtungsgesetz) geht dann über in

$$P = 1 - (1 - P_p)^n. \tag{48}$$

P_p berücksichtigt Gegenwirkung und Zuverlässigkeit. Als erforderliche Schußzahl n erhält man dann

$$n = \frac{\ln (1 - P)}{\ln (1 - P_p)}{}^{1)} \quad . \tag{49}$$

5.5. Das Ausreißerproblem

Bei einem Vergleich von Werten einer Meßreihe trifft man immer wieder auf das sogenannte Ausreißerproblem. Es kommt sehr häufig vor, daß sich unter den beobachteten Werten einer (oder auch mehrere) befindet, der von den übrigen Beobachtungen stark abweicht. Dabei stellt sich das Problem, diesen Wert bei der Berechnung der Stichprobenparameter — insbesondere bei der Berechnung der Standardabweichung s der Stichprobe — mitzunehmen oder als sog. Ausreißer auszuschalten. Das Ausreißerproblem besteht also darin, ein Kriterium für die Aus- bzw. Nichtausschaltung besonders großer Abweichungen anzugeben. Ein solches Kriterium sollte nicht mehr — wie es in der Praxis häufig vorkommt — irgendwelche subjektive Ermessungsfragen beinhalten, doch ist ein gewisses Maß an Willkür oft unvermeidbar. Selbstverständlich hängt das Auftreten eines Ausreißers von dem Aussehen bzw. von der Streuung des gesamten Treffbildes ab. Das gesuchte Kriterium wird eine Beziehung zwischen den Stichprobenparametern $\bar{x}$ und s sowie der Abweichung des vermuteten Ausreißers darstellen.

5.5.1. Das Ausreißerkriterium nach CHAUVENET

Für die Praxis des Schießens befindet sich noch die Ausreißerregel von CHAUVENET in der Anwendung. Sie sei zunächst behandelt.

Es wird eine Tabelle der GAUSS-Verteilung benutzt, in der die Abweichungen im Verhältnis zur wahrscheinlichen Abweichung tabelliert sind. D.h.: Bedeuten L die Abweichungen und w die wahrscheinliche Abweichung, so wird die Verteilungsfunktion mit $\Phi\left(\frac{L}{w}\right)$ bezeichnet. Ferner sei M die größte vorkommende Abweichung und μ der wahre Mittelwert.

Dann ist nach Gleichung (10) die Wahrscheinlichkeit P dafür, daß ein Treffer innerhalb eines Streifens von der Breite 2 M mit dem Mittelpunkt μ liegt:

---

1) Für eine genauere Behandlung der mit diesem Problem zusammenhängenden Fragen sei auf das Buch Wentzel, Operationsforschung [3], verwiesen.

$$P = \int_{-\frac{M}{w}}^{+\frac{M}{w}} \varphi(x)\,dx = 2\,\Phi\left(\frac{M}{w}\right) - 1. \tag{50}$$

Für die Wahrscheinlichkeit, daß die Abweichung von μ größer als M wird, gilt damit nach 5.1:

$$1 - P = 2\left[1 - \Phi\left(\frac{M}{w}\right)\right]. \tag{51}$$

Bei n Schüssen liegen im Mittel somit

$$n(1 - P) = 2n\left[1 - \Phi\left(\frac{M}{w}\right)\right] \tag{52}$$

Schüsse außerhalb des Streifens. Nach CHAUVENET liegt nun genau dann ein Ausreißer vor, wenn

$$2n\left[1 - \Phi\left(\frac{M}{w}\right)\right] \geqslant \frac{1}{2} \tag{53}$$

ist. In dieser Beziehung (53) steckt die eingangs erwähnte Willkür in der Angabe von 1/2 als Schranke. Setzt man in Gleichung (53) das Gleichheitszeichen, so erhält man

$$\Phi\left(\frac{M}{w}\right) = \frac{4n - 1}{4n} = 1 - \frac{1}{4n}. \tag{54}$$

Welche Irrtumswahrscheinlichkeit α gehört zu diesem Kriterium?

$$\alpha = 1 - e^{-n\left[1-\Phi\left(\frac{M}{w}\right)\right]} = 1 - e^{-n\left[1-\left(1-\frac{1}{4n}\right)\right]} \tag{55}$$

$$= 1 - e^{-\frac{1}{4}} = 0{,}22;$$

d.h. je rund ein Viertel der Ausreißer beurteilt man hinsichtlich des größten und des kleinsten Meßwertes falsch; mit anderen Worten: Beim CHAUVENET-Kriterium beurteilt man 50 % aller Ausreißer als falsch.

Bei der Anwendung der CHAUVENETschen Regel in der Praxis wird zunächst die wahrscheinliche Abweichung w vom gesamten Treffbild ermittelt. Danach wird geprüft, ob einer der Stichprobenwerte eine so große Abweichung hat, daß

$$|x_i - \bar{x}| > \kappa\, w \tag{56}$$

wird, wobei κ für die verschiedenen Schußzahlen aus der Tabelle 505 zu entnehmen ist. κ wurde nach Gleichung (54) bestimmt.

Tabelle 505. *Ausreißerfaktoren nach* CHAUVENET.

Schußzahl n	Ausreißerfaktor κ	Schußzahl n	Ausreißerfaktor κ
3	2,05	22	3,38
4	2,27	23	3,41
5	2,43	24	3,43
6	2,57	25	3,45
7	2,67	26	3,47
8	2,76	27	3,49
9	2,84	28	3,51
10	2,91	29	3,53
11	2,97	30	3,55
12	3,02	31	3,57
13	3,07	32	3,59
14	3,11	33	3,60
15	3,15	34	3,62
16	3,19	35	3,63
17	3,23	36	3,65
18	3,26	37	3,66
19	3,29	38	3,68
20	3,32	39	3,69
21	3,35	40	3,70

Wie schon erwähnt, gibt es mehrere Ausreißerregeln, die alle, wie auch die Regel von CHAUVENET, ein gewisses Maß an Willkür enthalten. Jedoch läßt sich mit Hilfe der STUDENT-Verteilung (s. 5.5.2) ein Ausreißerkriterium angeben, das vom mathematischen Standpunkt aus gesehen objektiv ist.

5.5.2. Das Ausreißerkriterium nach STUDENT [4]

Im folgenden soll dieser STUDENT-Test kurz beschrieben werden, wobei nur die Testgleichung angegeben und deren Gebrauch für die Praxis kurz dargelegt wird.

Wenn N der Stichprobenumfang und x_A die Koordinate des vermuteten Ausreißers ist, dann gilt die Testgleichung

$$\frac{N}{N-1}\, t_{S,N-2} \cdot s < | x_A - \bar{x} | . \qquad (57)$$

Darin bedeutet

- s = Standardabweichung ohne Ausreißer x_A,
- $\bar{x}$ = Mittelwert der Stichprobe ohne Ausreißer x_A,
- $t_{S,N-2}$ = Wert der STUDENT-Variablen entsprechend der vorgegebenen Sicherheit S und des Freiheitsgrades (N−2).

Um den STUDENT-Test (der ein sog. Signifikanztest ist) anwenden zu können, braucht man also eine Tabelle der t-Variablen mit verschiedenen Irrtumswahrscheinlichkeiten α in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang N. Auf die Einzelheiten der STUDENT-Verteilung kann hier nicht näher eingegangen werden.

5.5.3. Das Ausreißerkriterium nach GRAF und HENNING

Der Herleitung der folgenden Regel von GRAF und HENNING [5] liegt die Normalverteilung zugrunde. Hier kann wieder nur das Ergebnis zusammengefaßt werden.

Ist unter (n + 1) Meßwerten eine auffallend große Abweichung vorhanden – also einer der Werte ausreißerverdächtig –, so bildet man den Mittelwert

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$$

und die Varianz

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2$$

der übrigen Werte ohne den vermuteten Ausreißer. Die auffallend große Abweichung x_A wird als Ausreißer ausgeschaltet, wenn gilt:

$$x_A > \bar{x} + k \cdot s. \qquad (58)$$

Einige Werte von k sind der Tabelle 506 zu entnehmen.

Tabelle 506. *Faktoren k in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n und von der Irrtumswahrscheinlichkeit α.*

α \ n	5	7	10	15	20	30
5 %	5,73	4,81	4,32	4,03	3,90	3,80
2,5%	8,59	6,36	5,35	4,77	4,52	4,30
1 %	14,22	8,73	6,78	5,74	5,32	4,94

n = Anzahl der Stichprobenelemente ohne Ausreißer x_A.

Für dieses Ausreißerkriterium ist folgende Faustregel gut zu gebrauchen: Es gelte $10 \leqslant n \leqslant 1000$. Danach wird ein Wert x_A nicht berücksichtigt, wenn

$$x_A > \bar{x} + 4\,s. \qquad (59)$$

Dabei sind $\bar{x}$ der Mittelwert und s die Standardabweichung der restlichen Werte ohne x_A. Für den oben angegebenen Bereich für n ist also $k \approx 4$.

Literatur

[1] Kreyszig, E.: Statistische Methoden und ihre Anwendungen. Göttingen 1968.

[2] Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik mit ihren Anwendungen in der Ballistik. Seminar Weil, 9.—18.3.1970.

[3] Wentzel, J.S.: Operationsforschung. Berlin 1966.

[4] Student: The probable error of a mean. Biometrika 6 (1908).

[5] Graf, U.; Henning, H.-J.: Zum Ausreißerproblem. Mitteilungsbl. f. Math. Stat. 4 (1952), H. 1, S.1—8.

Ferner:

Churchman — Ackoff — Arnoff: Operations Research. Wien, München 1966.

Drescher, M: Strategische Spiele. Zürich 1961.

Fisz, M.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik. 5. erw. Aufl., Berlin 1970.

Graf — Henning — Stange: Formeln und Tabellen der mathematischen Statistik. Berlin, Heidelberg, New York 1966.

Hristow, W.K.: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und Methode der kleinsten Quadrate. Berlin 1961.

Smirnow, N.W.; Dunin — Barkowski, I.W.: Mathematische Statistik in der Technik. Berlin 1963.

Wentzel, J.S.: Elemente der Spieltheorie. Zürich, Frankfurt a.M. 1964.

Wolff, W.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und das Problem der Geschoßstreuung. Berlin 1959.

6. Zielen und Richten

Zielen bedeutet, von der Waffe aus eine optische Achse zum Ziel oder — bei verdeckten Zielobjekten — zu einem Hilfspunkt herzustellen. Bezogen auf diese Achse ist die Waffe bereits vorher gerichtet worden (Visier) oder wird sie anschließend gerichtet.

Die Zielachse und die Waffenachse weichen voneinander ab; diese Abweichung wird in der Höhe (Erhöhung) durch die Ballistik der Waffe sowie die Zielentfernung und in der Seite (Seitenvorhalt) bei bewegten Zielen durch die Zielgeschwindigkeit und die Geschoßflugzeit bis zum Ziel kontrolliert. Außerdem werden besondere Einflüsse als Richtkorrektur berücksichtigt.

Heute werden an das Zielen und Richten — gleich, ob es sich um Rohrwaffen oder Raketen handelt — Anforderungen gestellt, die in vielen Fällen mit einfachen optischen und mechanischen Richtmitteln kaum zu bewältigen sind. Rechnende Zielwerke und maschinelle Richtwerke lösen Visiere im landläufigen Sinne und die Handrichtmaschinen ab. Dem Richtschützen werden dadurch sowohl Rechen- und Denkarbeit als auch physische Beanspruchungen abgenommen; ihm bleibt die Aufgabe des Abfeuerns, wenn die Waffe gerichtet ist, bzw. der Überwachung der automatischen Einrichtungen und notfalls einer geringen Korrektur.

Mit Radar, Laser und anderen optronischen Geräten sowie automatischen Antrieben ausgerüstete Feuerleiteinrichtungen stellen vielfach einen Aufwand dar, der den für die eigentliche Schußwaffe übersteigt. Deshalb sollten für jedes Gerät die eigentliche Waffe und die Feuerleitanlage in ihren Leistungen sorgfältig aufeinander angepaßt werden.

Die Waffe, die Lafette, die Feuerleit- und Richtanlagen sowie das Bedienungspersonal bilden eine Einheit, die einzeln oder im Verbund als Waffen*system* zu bezeichnen sind. Für die Auslegung und Gestaltung sollten daher systemtechnische Methoden angewandt werden, d.h. die einzelnen Komponenten, so auch die Feuerleit- und Richtanlage, sind in systemgerechter Optimierung auf die Waffe abzustimmen.

6.1. Allgemeine Bedingungen für Ziel- und Richtmittel

Allen Ziel- und Richteinrichtungen liegt die Forderung zugrunde, der Waffe diejenige Seiten- und Höhenrichtung zu erteilen (sie so zu richten), daß die Flugbahn des aus ihr verfeuerten Geschosses die Zielebene im Zielpunkt schneidet. Geschütze auf beweglichen und schwankenden Waffenträgern (Schiffsgeschütze und Panzerwaffen) unterliegen besonderen Bedingungen, so daß hier Stabilisiereinrichtungen sowie die Eingabe der eigenen Position in die Feuerleitanlage notwendig sind.

Das Zielen und Richten läßt sich in folgende vier grundlegende Vorgänge unterteilen:

Zielerkennung und Zielauffassung, d.h. Vermessung der Zielkoordinaten relativ zum Standort der Waffe (Akquisition des Zieles),

Zielverfolgung zur Ermittlung von direkten oder indirekten Werten für die Zielgeschwindigkeit (bei bewegten Zielen),

Ermittlung und Berechnung der notwendigen Vorhaltewerte für die Seiten- und Höhenrichtung,

Übermittlung dieser Werte an die Zieleinrichtung und Richten, ggf. kontinuierlich bei bewegten Zielen.

Bei den einfachen Schußwaffen, den Handfeuerwaffen, ist das Befolgen der vorgenannten Reihenfolge oft in die Hand des über Kimme und Korn zielenden Schützen selbst gelegt; die entweder auf Schätzwerten beruhende oder mit einfachen Visieren (MG-Visieren) ermittelte Zielentfernung wird als Höhenvorhalt durch Höhenverstellung der Kimme berücksichtigt, während der Seitenvorhalt bei bewegten Zielen nach entsprechenden Marken im Visier gegeben wird.

Für die verhältnismäßig komplizierten Ziel- und Richtwerke der Geschütze gilt, daß im Rahmen des mit ihnen beabsichtigten Erfolges der Aufwand dennoch auf das Notwendige beschränkt bleiben sollte, daß ferner ihre Bedienung so einfach wie möglich sein muß und daß sie sich weitestmöglich der zwischen der Zielauffassung und der Feuereröffnung zur Verfügung stehenden kurzen Zeit anpassen; schließlich, daß sie so genau arbeiten, daß die Erledigung der gestellten Aufgabe mit dem geringsten Munitionsaufwand gewährleistet ist.

6.1.1. Das artilleristische Winkelmaß

Die artilleristischen Ziel- und Richtverfahren fußen auf dem Messen von Winkeln und Entfernungen. Dabei treten die als Längen ermittelten Werte für das Feuerkommando auch als Winkelmaße in Erscheinung. Die Winkelmaße bzw. die Kreisteilung sind daher die Grundlage aller Berechnungen und Einstellungen.

Die Bedingungen an eine für artilleristische Zwecke geeignete Kreisteilung sind, daß deren kleinste Einheit in der praktischen Anwendung keine Unterteilung mehr benötigt und daß sie mit ausreichender Genauigkeit auf der Grundlage der Beziehung zwischen Winkelmaß und Bogenlänge ein einfaches Umrechnen von Strecken in Winkel und umgekehrt ermöglicht.

Die heute in der Artillerie und der Schußtafel-Ballistik allgemein gebräuchliche Kreisteilung in *Strich* entspricht diesen Bedingungen weitgehend.

In der Tabelle 601 sind einige Kreisteilungen (Winkelmaße) für Umrechnungszwecke gegenübergestellt.

Tabelle 601. *Kreisteilungen.*

Vollkreis	Gon (Neugrad)	Neuminute	Grad (Altgrad)	Minute	„Wahre Tausendstel"	Strich NATO	Strich russisch
1	400	40000	360	21600	6283	6400	6200
1/400	1	100	0,9	54	15,708	16	15,5
1/40000	0,01	1	0,009	0,54	0,1571	0,16	0,155
1/360	1,111	111,11	1	60	17,45	17,78	17,22
1/21600	0,01852	1,8519	0,01667	1	0,2909	0,2963	0,2870
1/6283	0,06366	6,366	0,05730	3,438	1	1,019	0,9868
1/6400	0,0625	6,25	0,05625	3,375	0,9817	1	0,9688
1/6200	0,06452	6,4516	0,05806	3,484	1,0134	1,032	1
1 Einheit entspr. bei 1000 m Entf. einer Treffpkt.-verlegung von	—	—	—	—	1 m	0,98 m	1,01 m

Die Neugradteilung (Gon) findet zunehmende Anwendung, und zwar sowohl im militärischen als auch im zivilen Bereich.

Die *Strichteilung* ist aus der sog. Teilung in „wahre Tausendstel" entstanden, bei der eine Einheit auf dem Umfang eines Kreises von 1000 m Radius einem Kreisbogen von genau 1 m entspricht ($2\pi \cdot 1000 =$ 6283 Bogenstücke zu 1 m). Wegen der schlechten Teilbarkeit der Zahl 6283 wurde sie auf 6400 aufgerundet.

Die Beziehungen zwischen Winkelmaß und Bogen (bei kleinen Winkeln Bogen ≈ Sehne) gestatten eine einfache Annäherungsumrechnung von Strecken in Teilstriche und umgekehrt nach der Formel

Winkel (Strich) x Entfernung (km) ≈ seitl. Verlegung (m).

6.1.2. Richtarten

Ist ein Ziel von der Feuerstellung aus einzusehen, d.h. können die Zielkoordinaten direkt gemessen und die Waffe direkt auf das Ziel gerichtet werden, so nennt man dies direktes Richten. Ist das Ziel

jedoch verdeckt, so daß seine Lage nur von einer anderen, seitwärts oder auf einer Geländeerhöhung liegenden Beobachtungsstelle aus oder mit Hilfe von Karten oder aus der Luft aufgefaßt werden kann, so spricht man vom indirekten Richten.

Beim *direkten Richten* der Höhe nach wird auf der Ziellinie aufgebaut. Bei flachen Flugbahnen und geringen Höhenunterschieden zwischen Geschütz und Ziel werden diese Höhenunterschiede als positive oder negative „Geländewinkel" genügend genau durch das Einschwenken der Visierlinie auf das Ziel berücksichtigt (sog. Schwenken der Flugbahn).

Beim *indirekten Richten* der Höhe nach dient der Libellenquadrant, ein mit einer Wasserwaage (der Libelle) arbeitender Winkelmesser, als Bezugsebene. Der Geländewinkel muß mit Hilfe der Zieleinrichtung ausgeschaltet werden.

Zum Einnehmen der Seitenrichtung werden die Rohre oder Abschußgestelle entweder *in* ihren Lafetten (Oberlafetten und Spreizlafetten) auf das Ziel gerichtet oder sie werden *mitsamt* ihren Lafetten (Drehring-, Drehscheiben- und Pivotlafetten) gerichtet (geschwenkt). Beim direkten Seitenrichten kann das Ziel unmittelbar angerichtet werden. Beim indirekten Richten sind trigonometrische Umrechnungen unter Zuhilfenahme einer sowohl zum Geschütz als auch zum Ziel günstiger gelegenen Meßstelle, des Richtpunktes, erforderlich. Bei der Feld- und Panzerartillerie sind diese Verfahren als Gleichlaufverfahren, Nadelverfahren (nach der Nordnadel oder der Bussole) und Richtpunktverfahren bekannt.

6.2. Die Zieleinrichtungen

Das Einstellen der gemessenen und aus den Schußtafeln entnommenen Werte und ihr Umwandeln in Geschützwerte zu dem Zweck, der Ziellinie ihre für das Treffen richtige Lage zum Geschützrohr zu erteilen, erfolgt an Zielwerken oder mittels solcher.

Man unterscheidet zwischen *Zielwerken mit* von der Aufsatzstellung und/oder von der Einstellung der Seitenverschiebung *abhängiger Ziellinie* und *Zielwerken mit unabhängiger Ziellinie.*

Die Zeigerzieleinrichtung (FH 105 mm L) (Bild 600) ist eine von der Rohrstellung unabhängige Zieleinrichtung. Alle Einstellungen an der ZZE für den Aufsatzwinkel beeinflussen nur die Stellung des Aufsatzzeigers. Der eingestellte Aufsatzwinkel wird mit der Höhenvorrichtung über ein Parallelogrammgestänge auf den Rohrzeiger übertragen. Rohrerhöhung und Aufsatzwinkel sind gleich, wenn sich die Indizes der beiden Zeiger decken. Ein durch Verkantung bedingter Seitenrichtfehler wird automatisch korrigiert.

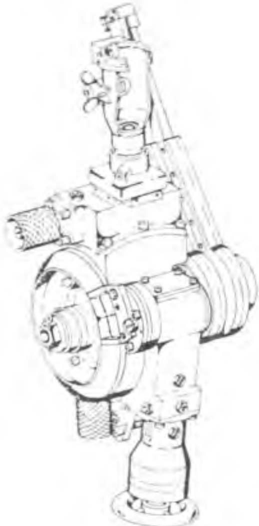


Bild 600. *Zeigerzieleinrichtung FH 105 mm L.*

Je nachdem, ob der Zapfen der Seitenverschiebungseinrichtung senkrecht bleibt oder mit dem Zielwerk mitschwingt, spricht man entweder vom *waagerechten* oder vom *schwingenden Seitenverschiebungs*richtkreis oder Seitenvorhalterichtkreis; der schwingende Richtkreis wird auch *Richtkreis in der Seitenvorhaltebene* genannt.[1] Versieht man solche Zieleinrichtungen mit einem Umrechner, einem sogenannten *Seitenvorhaltewandler,* so kann man die Seitenverschiebung je nach Kommando im waagerechten Seitenverschiebungsrichtkreis oder in der Seitenvorhaltebene einstellen.

1) Siehe 6.2.1, Schwingender und waagerechter Seitenvorhalterichtkreis.

6.2.1. Schwingender und waagerechter Seitenvorhalterichtkreis

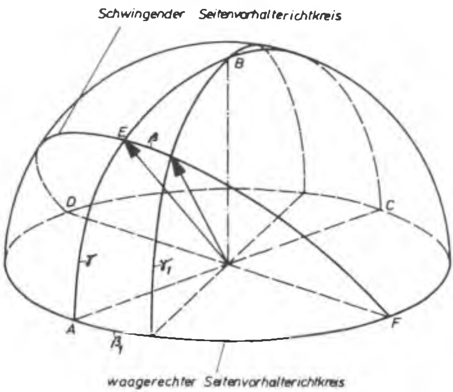


Bild 601. *Schwingender und waagerechter Seitenvorhalterichtkreis, dargestellt an der Einheitskugel.*

Im Bild 601 stellt der Halbkreis ABC die (senkrechte) Rohrerhöhungsebene dar; der Halbkreis DEF ist der (halbe) schiefgestellte (schwingende) Richtkreis, auf dem die durch einen Pfeil dargestellte Ziellinie um den Winkel β (den scheinbaren Seitenvorhalt) geschwenkt ist. Zeigt die ausgeschwenkte Ziellinie auf das Ziel, so ist β_1 der dazugehörige „wahre" Seitenvorhalt des Rohres; die Ziellinie schließt mit der Waagerechten (dem waagerechten Richtkreis) den Zielhöhenwinkel γ_1 ein, während der (schwingende) Richtkreis selbst die Erhöhung γ hat. Um dem Rohr die verlangte Höhe und Seite zu geben, muß also die Ziellinie auf dem schwingenden Richtkreis gegenüber der verlangten, wahren Seitenabweichung um den Winkel $(\beta_1 - \beta)$ weniger ausgeschwenkt sein, und der Aufsatzwinkel muß gegenüber dem schußtafelmäßigen Wert um das Maß $(\gamma - \gamma_1)$ vermindert werden.

Mit den vorgenannten Größen

β = Seitenvorhalt der Ziellinie in der Fernrohrerhöhungsebene DEF, also im schwingenden Richtkreis,

β_1 = dazugehöriger (wahrer) Seitenvorhalt im waagerechten Seitenvorhalterichtkreis,

γ = Erhöhung des schwingenden Richtkreises und

γ_1 = Zielhöhenwinkel

bestehen folgende Beziehungen, die zur Berechnung jeder dieser Größen aus zwei anderen dienen können:

$$\frac{\sin \beta_1 \cos \gamma_1}{\sin \beta} = 1; \qquad \frac{\cos \beta_1 \tan \gamma}{\tan \gamma_1} = 1;$$

$$\frac{\tan \beta_1 \cos \gamma}{\tan \beta} = 1; \qquad \frac{\cos \beta \sin \gamma}{\sin \gamma_1} = 1.$$

Den Winkel $\rho = (\gamma - \gamma_1)$ nennt man den Berichtigungsregler.

6.2.2. Die Schildzapfenverkantung und die dabei entstehenden Richtfehler

Ist die Grundlage eines Zielwerks nicht genau waagerecht, so entstehen Richtfehler der Seite und Höhe nach, die erheblich sein können. Die Voraussetzung, daß die Grundlage eines Geschützes stets waagerecht ist, trifft nur bei fest eingebauten Geschützen zu, z.B. bei Küstengeschützen. Bei Feldgeschützen kann man u.U. mehr oder weniger genau eine waagerechte Grundlage schaffen. Bei Bordgeschützen muß im allgemeinen damit gerechnet werden, daß das Geschütz die Schwankungen der Unterlage mitmacht; das gilt insbesondere für Schiffsgeschütze und Geschütze auf Fahrzeugen (Panzergeschütze).

Steht ein Geschütz dadurch schief, daß sich seine Unterlage um eine parallel zur Schildzapfenachse laufende Achse geneigt hat, so kann dieser „Längsauskippung", bei Landgeschützen „Hang", bei Schiffsgeschützen „Kippwinkel" genannt, ohne weiteres dadurch begegnet werden, daß man das Zielfernrohr durch Bedienen der Höhenrichtmaschine wieder auf das Ziel bringt und auf dem Ziel hält.

Während durch das Längsauskippen also nur ein Fehler in der Rohrerhöhung eintritt, wird dagegen bei allen anderen Schiefstellungen auch die Seitenrichtung des Geschützrohres geändert, und zwar ist bei einem rein „querausgekippten" Geschütz, das um eine in der senkrechten Rohrerhöhungsebene oder parallel dazu liegende waagerechte Achse

verkantet ist[1]), der Fehler der Seitenrichtung bedeutend größer als der Fehler der Höhe.

Ohne hier auf die sphärisch-trigonometrische Beweisführung näher einzugehen [1], seien nachstehend die mathematischen Beziehungen zur Ermittlung der durch die Verkantung hervorgerufenen Richtfehler angegeben.

Hat ein Geschützrohr die Erhöhung α und wird es mit seiner Unterlage um eine in der Schußrichtung liegende waagerechte Achse um den Winkel φ verkantet (querausgekippt), so wird die Seitenrichtung um den Winkel β_f geändert, der sich errechnet aus

$$\tan \beta_f = \tan \alpha \sin \varphi .$$

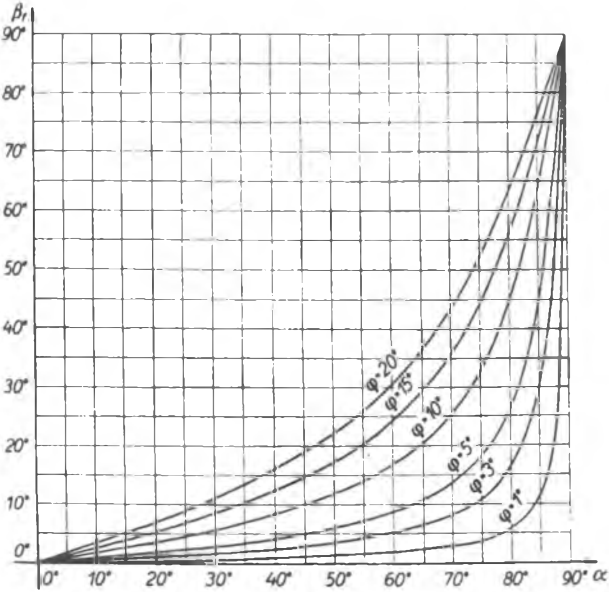


Bild 602. *Seitenfehler bei Querauskippung.*

---

[1]) Diese Auskippung heißt „Schildzapfenverkantung", bei Feldgeschützen auch „schiefer Radstand"; der Winkel wird als „Kantwinkel" bezeichnet.

Durch die Verkantung nimmt gleichzeitig die Erhöhung des Rohres auf einen Winkel α_1 ab, der gegeben ist durch

$$\sin \alpha_1 = \sin \alpha \cos \varphi.$$

Der Höhenrichtfehler (Verkantungs- oder Krängungsfehler für die Höhe) ist also

$$\alpha_f = \alpha - \alpha_1 .$$

In den Bildern 602 bis 604 sind die Seitenfehler β_f und die Höhenfehler α_f in Abhängigkeit von der Rohrerhöhung α für verschiedene Kantwinkel φ aufgetragen, wobei zu beachten ist, daß die Maßstäbe für β_f und α_f verschieden sind.

Der weitaus größte Fehler kommt in die Seitenrichtung; der schnellen Ermittlung dieses Fehlers wird deshalb von jeher große Bedeutung beigemessen. Als Faustformel gilt die bequeme Regel, daß bei 45°

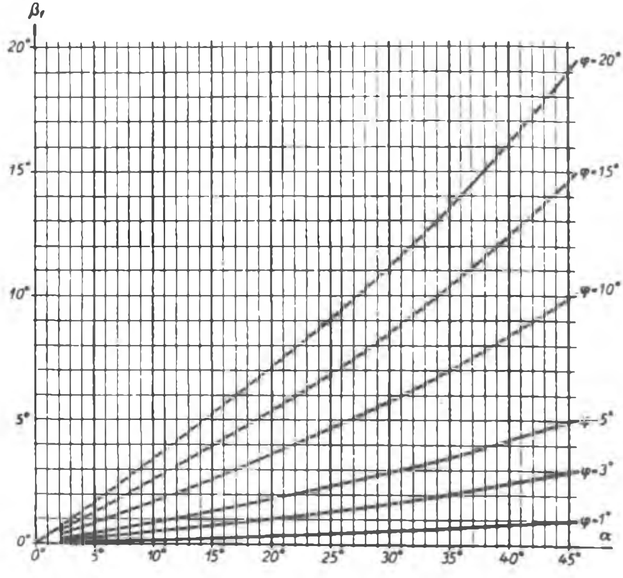


Bild 603. *Vergrößerter Ausschnitt aus Bild 602.*

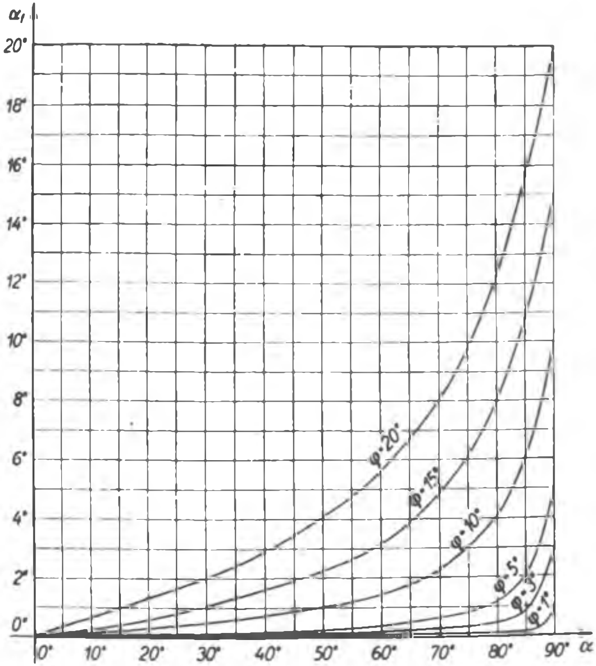


Bild 604. *Höhenfehler bei Querauskippung.*

Rohrerhöhung der Seitenrichtungsfehler ungefähr gleich der Verkantung ist.

Um die Verkantungsfehler zu eliminieren, d.h. das durch die Verkantung (Querauskippung) fehlgerichtete Rohr wieder in seine richtige Lage zu bringen, müssen die Fehler in der Höhen- und Seitenrichtung, die sich auf ein waagerechtes, nicht mitausgekipptes Koordinatensystem beziehen, durch Richten des Rohres um die mitausgekippte Schildzapfenachse und die ebenfalls mitausgekippte Schwenkachse ausgeschaltet werden.

6.2.3. Das Horizontieren

Um die im vorigen Abschnitt (6.2.2) behandelten Richtfehler durch Verkantung (Querauskippung) auszuschalten, muß dafür gesorgt werden, daß die Bezugsebene für die Zieleinrichtung waagerecht liegt. Dazu muß entweder das ganze Geschütz „in die Waage gelegt", d.h. horizontiert werden, oder es wird nur die Zieleinrichtung horizontiert.

Im erstgenannten Fall, den man „direktes Horizontieren" nennt, müßte man für eine stets waagerechte Geschützunterlage (mit senkrechtem Schwenkzapfen oder, was dasselbe bedeutet, mit waagerechtem Richtkreis) sorgen, indem man diese entweder waagerecht planiert oder aber das Geschütz kardanisch aufhängt. Das eine ist in der Praxis nicht immer ohne weiteres möglich, das andere ist nur mit großen, aufwendigen Mitteln zu erreichen. Man wählt daher meist die Alternative, nur die Zieleinrichtung zu horizontieren und dann das Geschütz nach der Vorgabe des Visiers der Seite und der Höhe nach laufend nachzurichten. Dieses Verfahren wird als „indirektes Horizontieren" bezeichnet.

Ist dagegen die Geschützunterlage ständigen Schwankungen unterworfen, wie es auf Schiffen fast immer und bei Fahrzeugen während des Fahrens der Fall ist, verwendet man Stabilisierungseinrichtungen, wie sie im Abschnitt 6.4 besonders behandelt werden.

Eine weitere Möglichkeit, Querauskippungen auszugleichen, stellt das *dreiachsige Geschütz* dar, wie es schematisch im Bild 885 (Kap. 8, Geschütze) dargestellt ist. Es hat neben der Schwenkachse und der Schildzapfenachse noch eine dritte Achse, die Einkippachse, die die Schildzapfenachse senkrecht kreuzt. Durch gleichzeitiges Arbeiten mit der Einkippachse und der Schildzapfenachse können alle Auskippungen, auch die zwischen der Längs- und der Querauskippung liegenden, beseitigt werden.

Das dreiachsige Geschütz nach Bild 885 beruht auf dem Rheinmetall-Patent 329 461 vom Jahre 1918. Nach diesem Prinzip sind zahlreiche Fla-Geschütze von 20 mm bis 105 mm Kaliber, meist in Doppellafetten, für alle größeren Einheiten der ehemaligen Kriegsmarine gebaut worden. Die 3,7-cm-Doppelflak (Bild 831, Kap. 8, Geschütze) besaß zum Ausgleich der Schiffsschwankungen eine selbsttätige Kreiseleinkantung; die 8,8-cm- und die 10,5-cm-Doppelflak (Bild 605) hatten Fernsteuerung für den Höhen- und den Kantwinkel.



Bild 605. *Ehemalige dreiachsige 10,5 cm S.K.C/33 in 10,5 cm Dopp. L.C/31.*

6.2.4. Die „toten Räume" und die Grenzen der Flugabwehr

Die an die Ziel- und Richtmittel zu stellenden Forderungen nach ausreichend großen Richtgeschwindigkeiten zum Verfolgen beweglicher Ziele hängen im wesentlichen von zwei Faktoren ab, nämlich der Größe der Zielgeschwindigkeit und der jeweiligen Zielentfernung: Je größer die Zielgeschwindigkeit und je kleiner die Zielentfernung, desto höher müssen die Richtgeschwindigkeiten und -beschleunigungen sein.

Bei sehr schnellen Flugzielen in geringer Entfernung kann es vorkommen, daß die von der Antriebsleistung her möglichen Richtgeschwindigkeiten und Richtbeschleunigungen nicht mehr zur erfolgreichen Zielbekämpfung ausreichen. Es entsteht um den Standort des Geschützes ein „toter Raum", innerhalb dessen es wegen Überschreitung der maximalen Richtgeschwindigkeiten für eine wirksame Kampfhandlung ausfällt.

Alle Zielpunkte, bei denen die mögliche Richtgeschwindigkeit gerade gleich der erforderlichen ist, d.h. bei denen die größtmögliche Richtgeschwindigkeit des Geschützes mit der erforderlichen Winkelgeschwindigkeit der Ziellinie übereinstimmt, bilden die Umhüllung dieses toten Raumes.

Im folgenden sind einmal die Werte gleicher Richtgeschwindigkeiten einer bestimmten Waffe mit bekannter v_0 und für bestimmte Zieldaten (Zielhöhe, Zielentfernung und Zielgeschwindigkeit) sowie bei verschiedenen Anflugrichtungen (Kursstrahlen) in der Zeichenebene (die der Kartenebene entspricht) aufgetragen und durch Kurven (Isotachen) untereinander verbunden. Es ist dabei vorausgesetzt, daß das Flugzeug in drei Kilometer Entfernung von der Flak gesichtet wird und daß es vom Augenblick der Sichtung an noch zwei Sekunden bis zur Feuerbereitschaft dauert.

In Bild 606 wird die Seitenrichtgeschwindigkeit betrachtet. Auf den Kursstrahlen der verschiedenen Anflugrichtungen sind diejenigen Orte des Flugzeuges festgelegt und durch Isotachen miteinander verbunden, in denen die Seitenrichtgeschwindigkeit der Geschützachse konstante Werte hat. Die Darstellung gilt für eine 20-mm-Waffe mit einer v_0 von 1060 m/s und für einen Tiefflieger, der 100 m über dem Mündungshorizont verschiedene geradlinige Kurse mit einer Geschwindigkeit von 250 m/s fliegt.

Diejenigen Isotachen, die den Wert der vom Geschütz abhängigen möglichen maximalen Seitenrichtgeschwindigkeit bezeichnen, begrenzen den jeweiligen toten Raum in der Kartenebene.

In Richtung des abgehenden Ziels werden die Isotachen von einer Grenzkurve umschlossen, die – unabhängig von einer noch so großen Seitenrichtgeschwindigkeit – die weiter entfernt liegenden Zielpunkte (Flugzeugpositionen) ausschließt, weil die Geschosse das Ziel infolge ihrer abgesunkenen Geschoßgeschwindigkeit nicht mehr erreichen.

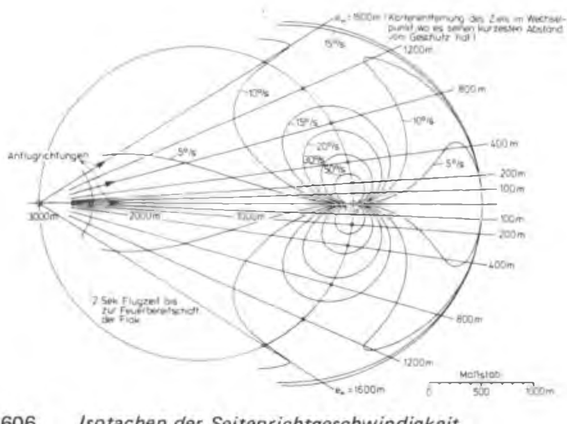


Bild 606. Isotachen der Seitenrichtgeschwindigkeit.

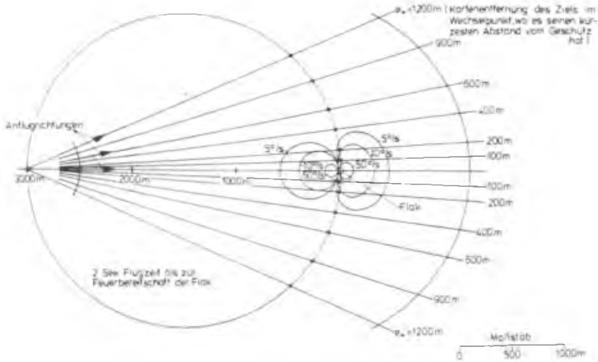


Bild 607. *Isotachen der Höhenrichtgeschwindigkeit.*

Für dieselbe Waffe und dieselben Flugzeugdaten sind in Bild 607 in gleicher Weise die Isotachen der Höhenrichtgeschwindigkeit dargestellt.

6.3. Die Mittel zum Zielen und Richten

Im folgenden sollen als Mittel zum Zielen und Richten
- optische und mechanische Instrumente, Geräte und Visiere,
- Feuerleit- und Kommandogeräte und
- moderne Verfahren wie Radar-, Fernseh-, Nachtsicht-, Wärmebild- und Lasertechnik

behandelt werden.

Dabei wird berücksichtigt, daß sich wegen der unterschiedlichen Aufgabenstellung bei der Fliegerabwehr und der Artillerie – insbesondere für die klassischen Verfahren – die Geräte in verschiedenen Richtungen entwickelt haben.

6.3.1. Optische und mechanische Instrumente und Geräte; Visiere für die Feld- und Panzerartillerie

6.3.1.1. Die optischen Mittel der Aufklärung

Die optische Aufklärung bedient sich in der Hauptsache der Fernrohr-Optik mit ihren Beobachtungsfernrohren, Zielfernrohren, Rundblickfernrohren und Entfernungsmessern.

Diese Verfahren sind als „passiv" zu bezeichnen, denn sie arbeiten unter Ausnutzung des von den Zielobjekten reflektierten Lichtes; d.h., der Beobachter kann vom Gegner nicht aufgrund einer verwendeten Lichtquelle ausgemacht werden.

Die optischen Geräte haben ferner den Vorteil der Bildgüte und eines guten Auflösungsvermögens, der von keinem anderen Erfassungsmittel übertroffen wird.

Von den in der Bundeswehr eingeführten Optiken werden in der Tabelle 602 die wesentlichen Daten einiger charakteristischer *Fernrohre* genannt.

Tabelle 602. *Zusammenstellung der optischen Daten einiger charakteristischer Fernrohre* [2].

Gerät		Austrittspupille AP	Geometrische Lichtstärke $(AP)^2$	Dämmerungszahl $D = V \cdot \sqrt{AP}$	Gesichtsfeld objektseitig (wahr)	Gesichtsfeld bildseitig (scheinbar)
Doppelfernrohr	6 x 30	5 mm	25	13,4	8,4°	50,4°
Doppelfernrohr	8 x 30	3,75 mm	14	15,5	8,4°	67,2°
Doppelfernrohr	7 x 50	7,1 mm	50	18,7	7,3°	51,1°
Doppelfernrohr	10 x 50	5 mm	25	22,4	6,9°	69°
Rundblickfernrohr	6 x 30	5 mm	25	13,4	10°	60°
Pankratisches Fernrohr kontinuierlich veränderlich bis	3 15	7 bis 3,5 mm	49 bis 12	8 bis 28	17° bis 3,4°	51°
Entfernungsmesser (Basis 1,72 m)	16 x 50	3,1 mm	9,6	28,3	2,5°	40°

Entfernungsmesser (Em) bestehen aus zwei Fernrohren, deren Objektive in einem gewissen Abstand — der Basis — in einem horizontalen Rohr eingebaut sind. Bei dem Mischbild-, Kehrbild- oder Schnittbild-Em erfolgt die Beobachtung durch ein gemeinsames Okular, bei dem stereoskopischen oder Raumbild-Em durch ein Doppelokular. Die Basis bildet mit dem Ziel einen spitzen Winkel, mit Hilfe dessen die Entfernung ermittelt werden kann. Die Genauigkeit der Entfernungsmessung hängt von der Größe des Winkels ab, also von der Größe der Basis, der Vergrößerung und der Entfernung, wobei die Entfernung den Meßfehler quadratisch vergrößert. Im Kampfpanzer Leopard wird ein Entfernungsmesser verwendet, der von Raumbild- auf Mischbildmessung umschaltbar ist.

6.3.1.2. Die mechanischen Richtmittel

Die mit den angeführten optischen Geräten ermittelten Werte (Richtung und Entfernung) werden in der zweiten Phase des Zielens und Richtens auf die Richtmittel übertragen. Dies kann mechanisch oder elektrisch geschehen.

Die mechanischen Richtmittel, die früher, d.h. vor Einführung der Elektronik ausschließlich zur Ermittlung der Vorhaltwerte dienten, werden heute bei einfachen Geräten wie Feldgeschützen, Granat- und Minenwerfern benutzt, wenn der Aufwand der Elektronik sich nicht lohnt; bei Ausfall der Elektrik dienen sie als Noteinrichtung.

Mechanische Richtmittel sind:

der *Aufsatz* zum Einstellen des Erhöhungswinkels,

der *Richtaufsatz* als Zusammenfassung von Aufsatz und Rundblickfernrohr (ein besonderes Gerät dieser Art ist die Einheits-Zeiger-Ziel-Einrichtung (EZZE) der Feldhaubitzen),

der *Seitenwinkelmesser* zur Übertragung des Seitenwinkels beim indirekten Richten der Panzerkanonen,

der *Libellenquadrant,* der im allgemeinen zum Justieren von Optik und Aufsatz dient; im Notfall kann er auch zum Richten des Rohres der Höhe nach verwendet werden.

Einzelheiten hierzu sind in den Leitfäden für den Dienstunterricht der Artillerie oder in Waffenfibeln nachzulesen.

6.3.2. Feuerleitgeräte für die Feld- und Panzerartillerie

Die unter 6.3.1 genannten Ziel- und Richtmittel sollen den Richtschützen in die Lage versetzen, die Richtung des Geschützrohres genau festzulegen. Die dazu nötigen Werte (Korrekturwerte) für Entfernung, Geländewinkel, Munitionsart und Ladung sowie die BWE (besondere und Witterungseinflüsse) kann er gegebenenfalls, so bei leichten Waffen und ausnahmsweise auch bei Feldgeschützen, selbst ermitteln und am Visier einstellen. Meist aber werden diese Schießunterlagen an zentralen Stellen, den Kommando- oder Feuerleitstellen, ermittelt, gesammelt, zu Kommandos geformt und an die einzelnen Waffen mit entsprechendem Feuerbefehl gegeben. Hierzu bedient man sich der Feuerleitgeräte.

Die *Feuerleitgeräte* sollen neben den vorstehend genannten Aufgaben aus den eingegebenen einzelnen Faktoren *genaue* Schießunterlagen liefern, die das Einschießen auf das geringste Maß abkürzen bzw. für Feuerschläge gänzlich überflüssig machen.

Ein solches Feuerleitgerät für die Feldartillerie ist z.B. das XAMAX-Gerät[1], ein verhältnismäßig schnell arbeitendes mechanisches Feuerleitgerät, das auf einem Plantischchen die Gefechtssituation für bis zu sechs Geschütze nachbildet.

---

1) Hersteller: XAMAX AG, Zürich.

6.3.3. Visiere und Feuerleitgeräte der Fla-Rohrwaffen

Aufgabe der für die Flugabwehr bestimmten Rohrwaffen ist die wirksame Bekämpfung von Flugzielen, vornehmlich von Tief- und Tiefstfliegern mit Geschwindigkeiten bis zu 1 Mach.

Zur Erzielung hoher Feuerdichten werden automatische Waffen kleiner bis mittlerer Kaliber (20 bis 40 mm) mit möglichst hoher Kadenz (je Rohr 1000 Schuß/min bei 20-mm-Waffen bis 200 Schuß/min bei 40-mm-Waffen) verwendet.

Die taktische Reichweite ist kaliberabhängig und liegt im Bereich zwischen 2000 und 4000 m.

Die Flugziele sollen bis in die Nähe des Wechselpunktes bekämpft werden. Die Zeiten für die Bekämpfung liegen in der Größenordnung von 5 bis 10 s.

Die Ziel- und Richteinrichtungen der Fla-Rohrwaffen müssen den vorgenannten taktischen Einsatzbedingungen Rechnung tragen. Um die zur Verfügung stehende kurze Bekämpfungszeit voll ausnutzen zu können, soll im Visier der Vorhalt nach Größe und Richtung dargestellt werden, noch bevor das Flugziel in den Abwehrbereich eintritt.

6.3.3.1. Fla-Visiere

Eines der bekanntesten Visiere für das direkte Richten einer Fla-Waffe ist das Kreiskornvisier (Bild 608). Es besteht aus einer Lochkimme und einem sog. Kreiskorn, dessen Strahlen (Radien) einen Anhalt für die scheinbare Flugrichtung geben; die konzentrischen Kreise entsprechen verschiedenen Zielgeschwindigkeiten. Der Abstand zwischen einem Geschwindigkeitspunkt (Abschußpunkt) auf einem dieser Kreise und dem Mittelpunkt (dem Treffpunkt) ergibt die Vorhaltestrecke. Wenn das Kreiskornvisier nur als Fla-Visier — wie bei der 20-mm-Waffe des Schützenpanzers — verwendet wird, genügt ein Ausschnitt entsprechend dem Bild 609.

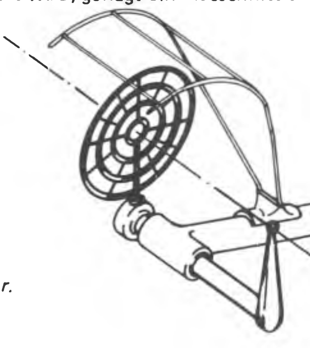


Bild 608. *Kreiskornvisier.*

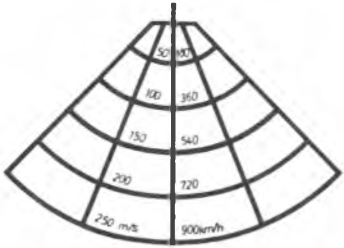


Bild 609. *Ausschließlich als Fla-Visier dienendes Kreiskornvisier.*

Das *Ellipsenvisier* (Bild 610) unterscheidet sich vom Kreiskornvisier durch eine andere Darstellung der Treffbildebene; während diese beim Kreiskornvisier senkrecht zur Visierlinie steht, stellt sie beim Ellipsenvisier eine Projektion des Treffbildes in die (Horizontal-) Ebene des fliegenden Zieles dar. Auch hier geben die „Einlaufstrahlen" dem Richtkanonier einen Anhalt für die scheinbare Flugrichtung; die Abstände zwischen dem Schnittpunkt eines Strahles mit einer Geschwindigkeitsellipse (Abschußpunkte) und dem Strichplattenmittelpunkt (Treffpunkt) bedeuten die Vorhaltestrecke.

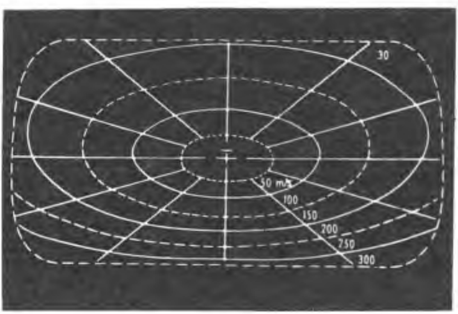


Bild 610. *Strichplatte des Ellipsenvisiers.*

Das *Delta-Visier*[1)] (Bild 611) ist ein Reflexvisier. Zur Erfassung der scheinbaren Flugrichtung erscheinen im Gesichtsfeld Polstrahlen. Die Vorhaltekurven — für verschiedene Geschwindigkeiten ausgelegt — werden automatisch von der Höhenbewegung gesteuert.

1)Konstruktion der Delta-Visier GmbH, Ottobrunn, nach Prof. Dr.-Ing. A. Kuhlenkamp.



Bild 611. *Delta-Visier (Delta-Visier GmbH, Ottobrunn).*

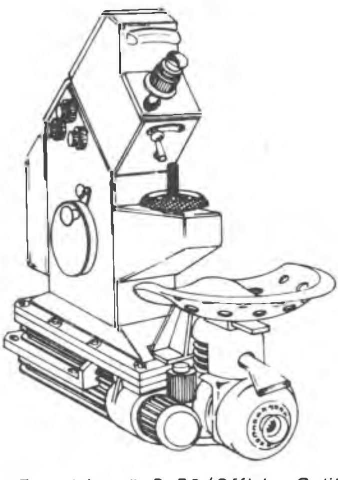


Bild 612. *Feuerleitgerät P. 56 (Officine Galileo, Florenz).*

Diese Visiere sind grundsätzlich nur für bestimmte Zieldaten ausgelegt, und der Schütze hat die Aufgabe, das Flugziel über dem Visierpunkt anzurichten, der der Geschwindigkeit und Flugrichtung des zu bekämpfenden Zieles entspricht.

Die Bekämpfung eines Zieles mit diesen Visieren läuft letzten Endes auf ein gezieltes Sperreschießen hinaus, wobei vor das Flugzeug eine Feuergarbe gelegt wird, in welche dieses hineinfliegt.

Als Beispiel für ein Visier, das in Verbindung mit einem Rechner aus gemessenen Zieldaten in Verbindung mit geschätzten, einstellbaren Zielwerten laufend den Vorhalt ermittelt, sei das Gerät P. 36 bzw. P. 56 erwähnt (Bild 612). Hier ist eine Kombination von Visier, Rechner, Steuerung und hydraulischem Antrieb mechanisch bzw. elektrohydraulisch verwirklicht. Der Schütze ist weitestgehend von der Arbeit des Richtens entlastet, ihn obliegt nur noch die Aufgabe, korrigierend in den Richtvorgang einzugreifen.

6.3.3.2. Feuerleitgeräte für die Rohrwaffen-Fla

Die einfachen Visiere wie Kreiskorn-, Ellipsenvisier u.a. liefern nur Anhaltswerte für den Vorhalt. Sie sind als Hilfsvisiere anzusehen, die zumeist nur für eine bestimmte Entfernung und gewisse Flugprofile ausgelegt sind. Sie können lediglich bei relativ kurzen Entfernungen (etwa unter 1000 m) mit Aussicht auf Erfolg eingesetzt werden.

Das gleiche gilt auch im wesentlichen für Einstellvisiere, bei denen vom Schützen geschätzte Zieldaten eingegeben werden. Zwar kann bei geeigneter Auslegung des Visiers der Kampfbereich erweitert werden, es wird aber im allgemeinen nicht die wirksame Reichweite der Waffenanlage ausgenutzt.

Der Kampf auf großen Entfernungen erfordert den Einsatz von Ziel- und Richtmitteln, die aufgrund von vermessenen Zieldaten den Vorhalt berechnen.

Die großen Erfolge der schweren Rohrwaffen-Fla, etwa des Kalibers 8,8 cm, die vor dem Auftreten der Lenkwaffen das Rückgrat der Flugabwehr in großen Höhen bildeten, ist auf den Einsatz der hochentwickelten Flak-Kommandogeräte zurückzuführen.

Für die deutsche Kriegsmarine war Rheinmetall schon in den 20er Jahren an der Entwicklung von Feuerleitgeräten für die damals im Bau befindlichen Kreuzer der K-Klasse (Köln, Königsberg usw.) beteiligt, mit denen dann erstmals die 15-cm-Drillingstürme dieser Schiffe und die 8,8-cm-Doppelflak weiterer Einheiten gerichtet wurden. Aus ihnen sind dann die Flakleitstände aller größeren Einheiten der damaligen Kriegsmarine entstanden, die wiederum die Vorläufer der im Kriege in

großer Zahl eingesetzt gewesenen Flak-Kommandogeräte der ehemaligen Luftwaffe waren [3].

An ein modernes Feuerleitsystem für die Rohrwaffen-Flugabwehr werden folgende Anforderungen gestellt:

Zielerkennung,
Identifizierung,
Zielauffassung und -verfolgung,
Berechnung des Vorhalts,
Übertragung der Richtwerte auf die Waffe,
Feuerbefehl,
Treffermeldung.

Das Feuerleitgerät „Super-Fledermaus" (Bild 613) ist die Weiterentwicklung einer bereits in den ersten Jahren nach dem letzten Kriege begonnenen Entwicklung eines Flak-Kommandogerätes. Mit seinen auf einem zweiachsigen Transportwagen aufgebauten Teilgeräten, nämlich dem Richtgerät, dem Such- und Feuerleitradar, dem elektronischen Rechengerät sowie dem v_0-Meßgerät, dient es sowohl zur Radarüberwachung von Luftraumabschnitten und der optischen oder Radarverfolgung des Ziels als auch der automatischen und laufenden Berechnung der genauen Treffpunktelemente. Sein Einsatz erfolgt u.a. an den Fla-Waffen 30 mm HS 831, 35 mm Oerlikon und 40 mm L/70 Bofors. Näheres über das Gerät ist bei [4] nachzulesen.



Bild 613. *Feuerleitgerät „Super-Fledermaus" (Contraves AG, Zürich).*

In dem mit automatischen Rohrwaffen ausgerüsteten Fla-Panzer steht den Heeresverbänden ein mobiles Tieffliegerabwehrsystem zur Verfügung. Die Forderungen an das Waffen- und Feuerleitsystem werden durch die taktischen Einsatzbedingungen gegeben.

Die wesentlichen Aufgaben, die ein Feuerleitsystem zu erfüllen hat, sind:

eine Erfassung und Darstellung der Luftlage, die eine schhelle Bedrohungsabschätzung und Zielanweisung ermöglicht,

automatische Zielverfolgung und Feuerleitung,

Allwetterfähigkeit.

Der von Rheinmetall in Zusammenarbeit mit den Firmen AEG-Telefunken, Krauss-Maffei, Porsche und Siemens entwickelte Fla-Panzer „Matador" ist mit folgenden Geräten ausgerüstet (Bilder 614 und 615):

einem Rundsuchradar in Pulsdopplertechnik, das die Luftlage auf einem PPI-Schirm darstellt;

einem Feuerleitradar in Pulsdopplertechnik, das zusammen mit einem Digitalrechner eine hohe Verfolgungsgenauigkeit sowie eine genaue Vorhalterechnung gewährleistet;

Panorama-Richtfernrohren, mit denen über einen Analogrechner Verfolgung und Vorhalterechnung in Verbindung mit Handsteuerung als redundantem System das Richten der Waffen aufgenommen werden kann.



Bild 614. *Fla-Panzer „Matador".*

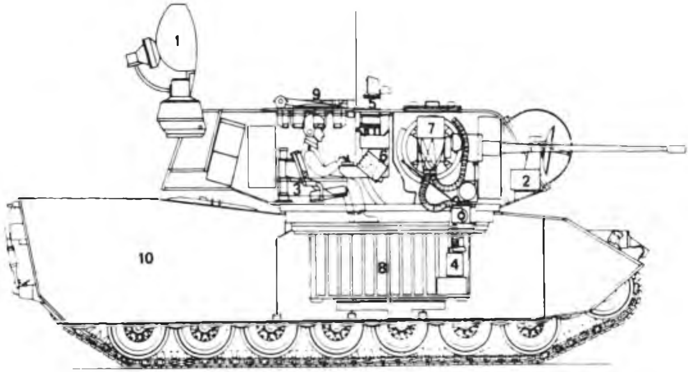


Bild 615. *Fla-Panzer „Matador", Schnittbild.*
1 Rundsuchradar (Siemens), 2 Feuerleitradar (AEG-Telefunken), 3 Hauptrechner (AEG-Telefunken), 4 Zweitrechner (Rheinmetall), 5 Rundsuchoptik (Rheinmetall), 6 Bedienfeld, 7 Waffenanlage (Rheinmetall), 8 Munitionskästen, 9 Turm mit Luken (Rheinmetall), 10 Fahrgestell (Porsche/Krauss-Maffei).

6.3.4. Moderne Techniken für das Beobachten und Zielen

Über die modernen Techniken, die in zunehmendem Maße in der Wehrtechnik Eingang gefunden haben, wie Radar, Fernsehen, Nachtsicht-, Wärmebild- und Lasertechnik, kann in diesem Rahmen nur einiges Grundsätzliche gesagt werden. Für Einzelheiten sei auf die Fachliteratur verwiesen.

6.3.4.1. Die Radartechnik

Ein wichtiges Mittel der Aufklärung ist die *Radar-* oder *Funkmeßtechnik,* meist kurz Radar (**R**adio **D**etecting and **R**anging) genannt. Sie dient zur Erfassung, Orts- und Geschwindigkeitsbestimmung von Objekten aller Art und wird dementsprechend hauptsächlich in der Schiffs- und Flugnavigation, in der Verkehrsüberwachung zu Lande, zu Wasser und in der Luft sowie in der Meteorologie angewandt. Auf militärischem Gebiet wird das Radar zur Zielsuche und Zielverfolgung, zur Steuerung von Flugzeugen und Lenkwaffen sowie von elektronischen Geschoß- und Raketenzündern benützt [5].

Radarwellen werden meist in Form kurzer Impulse ausgesendet. Aus der Laufzeit der reflektierten Impulse wird die Entfernung des Ziels

ermittelt. Eine scharfe Energiebündelung ermöglicht darüber hinaus eine genaue Richtungsbestimmung. Im Empfänger werden die von einer Antenne aufgenommenen, meist sehr schwachen Echosignale so verstärkt, daß sie im Anzeigegerät ausgewertet und dargestellt werden können.

Für die Darstellung der gewonnenen Daten auf dem Bildschirm einer Braunschen Röhre sind je nach dem Verwendungszweck eine Reihe von verschiedenen Verfahren gebräuchlich. Eine vielgebrauchte Anzeigeform ist die Rundsicht- oder PPI-Darstellung, die ein Kartenbild der Umgebung ergibt.

Außer den reinen Impulsradarsystemen, die eine Entfernungsselektion ermöglichen, gibt es noch weitere Systeme, so das Pulsdopplerradar, das vor allem im militärischen Bereich verwandt wird. Bei diesem System wird außer der Laufzeit zur Entfernungsbestimmung das Impulsecho auch hinsichtlich der Frequenzänderung zur Geschwindigkeitsermittlung des Objektes nach dem Dopplerschen Prinzip ausgewertet.

Diese Pulsdopplerradare werden vorzugsweise eingesetzt, wenn nur bewegte Ziele selektiert und alle Festzeichen unterdrückt werden sollen.

Auch die impulsfreien Radarsysteme — auch CW-Geräte (continuous wave- oder Dauerstrahl-Geräte) genannt — arbeiten nach dem Dopplerschen Prinzip; sie sind besonders zur Geschwindigkeitsmessung geeignet.

Im Kapitel 14, Ballistische und waffentechnische Meßverfahren, ist im Abschnitt 14.3.2 die Radartechnik in ihrer Anwendung für die Geschoßgeschwindigkeitsmessung ausführlicher und mit weiteren Literaturhinweisen behandelt.

6.3.4.2. Die Fernsehtechnik

Die Verwendung von Okulargeräten im Panzer zur Aufklärung, Beobachtung und Zielvermessung ist während der Fahrt durch das Gelände meist schwierig. Daher gewinnt der Einsatz von Tagesfernsehanlagen, bei denen die Szene auf einem Monitor beobachtet werden kann, zunehmend an Bedeutung.

Den Vorteilen solcher Anlagen, nämlich beidäugige Beobachtungen des Monitors ohne Augenanlage und mehr oder weniger große Freiheit in der Installation von Kamera und Monitor, stehen allerdings einige Nachteile gegenüber, und zwar eine durch die begrenzte Zeilenzahl je Bild bedingte begrenzte Auflösung des Bildes und die fehlende Farbinformation bei Verwendung von Schwarzweißfernsehern. Der letztgenannte Nachteil kann nur durch erhöhten technischen Aufwand mittels Farbfernsehern erkauft werden.

6.3.4.3. Die Nachtsichttechnik [7], [8], [9]

Neben dem Einsatz von *pyrotechnischen Mitteln* (Leuchtsätzen, s. S. 65) zur Beleuchtung der Szene, wodurch eine Beobachtung mit Tagessichtgeräten ermöglicht wird, kommen folgende zwei Verfahren zur Anwendung, nämlich die *aktive Infrarottechnik* und die *passive Bildverstärkung*, die entweder *direkt* oder über *Schwachlicht-Fernsehanlagen* arbeitet.

6.3.4.3.1. Die aktive Infrarottechnik

Die Infrarotstrahlung [6], [2] schließt an den Spektralbereich des sichtbaren Lichtes nach längeren Wellen hin an. Sie wird durch einen Scheinwerfer erzeugt, bei dem durch ein geeignetes Filter die sichtbare Strahlung unterhalb von etwa 900 nm ausgeblendet ist und nur die infraroten Strahlen austreten. Das Vorfeld wird also mit einer für das Auge nicht wahrnehmbaren IR-Strahlung beleuchtet und das Bild über ein mit einer Bildwandlerröhre ausgestattetes Sichtgerät dem Auge des Beobachters sichtbar gemacht.

Die aktive IR-Technik ist von den natürlichen Lichtverhältnissen unabhängig und liefert durch Schattenbildung ein kontrastreiches Bild. Beim Einsatz von Hochleistungsscheinwerfern ist auch die Beobachtung extrem dunkler Szenen möglich.

Nachteilig ist bei diesem Verfahren allerdings, daß der Standort des eigenen Scheinwerfers vom Gegner mittels *seiner* Bildwandler leicht ausgemacht werden kann.

Ein weiterer Nachteil ist die starke Streuung des ausgesandten Lichtes beim Durchgang durch die Atmosphäre, insbesondere bei Dunst und Nebel, wodurch eine störende Aufhellung des Vorfeldes und eine Reduzierung der Reichweite eintritt.

Infrarot-Zielgeräte sind bereits gegen Ende des Zweiten Weltkrieges u.a. für Handfeuerwaffen angewandt worden. Bild 616 zeigt ein solches Zielgerät in moderner Ausführung.

Die aktive IR-Technik hat erheblich an Bedeutung gewonnen durch die Anwendung des „Gated-Viewing"-Verfahrens. Hierbei strahlt ein Impulsscheinwerfer — etwa ein gepulster GaAs-Laser — als Illuminator mit einer Pulsfolgefrequenz von einigen kHz extrem kurze IR-Lichtimpulse — Lichtpakete — von etwa 100 bis 200 ns Dauer aus. Das Sichtgerät wird nun elektronisch so gesteuert, daß es nur für die Lichtpakete, die aus der interessierenden Entfernung zurückkommen, geöffnet, dagegen für alle anderen Entfernungen geschlossen ist. Streulicht und unerwünschte Vorfeld- und Hintergrundbeleuchtung werden damit weitestgehend eliminiert.



Bild 616. IR-Zielgerät für Handfeuerwaffen auf Gewehr G 3 (Eltro, Heidelberg).

Ein Anwendungsgebiet der Infrarotstrahlung ist auch das unsichtbare Signalisieren (Blinken).

6.3.4.3.2. Passive Bildverstärker und Schwachlicht-Fernsehanlagen (LLLTV)

Beide Systeme nutzen die auch in dunklen Nächten immer noch vorhandene Reststrahlung des Nachthimmels aus, indem diese so weit verstärkt wird, daß dem Beobachter am Okular des Bildverstärkergerätes bzw. auf dem Monitor einer LLLTV-Anlage ein hinreichend helles Bild vermittelt werden kann.

Diese Geräte arbeiten passiv, der Benutzer kann vom Gegner nicht ausgemacht werden.

Da die Nachtbeleuchtung diffus strahlt, fehlt hier die Schlagschattenwirkung, worunter in der Praxis der Zielkontrast leidet.

Bild 617 zeigt eine passive Nacht-Fernsehzielanlage an einem Kampfpanzer.



Bild 617. *Passive Nacht-Fernsehzielanlage an einem Kampfpanzer (AEG-Telefunken).*

6.3.4.4. Die Wärmebildtechnik

Die von den Objekten einer Szene ausgehende Wärmestrahlung wird in der Bildebene von Sensoren aufgefangen, Punkt für Punkt abgetastet und nach Umwandlung in elektrische Signale auf einem Fernsehschirm als Wärmebild wiedergegeben.

Moderne Wärmebildgeräte besitzen eine so hohe geometrische Auflösung, daß außer der für die Zielobjekte charakteristischen Temperaturverteilung auch deren Konturen noch darstellbar sind. Bild 618 zeigt das bei Nacht aus 250 m Entfernung aufgenommene Wärmebild eines Kampfpanzers.

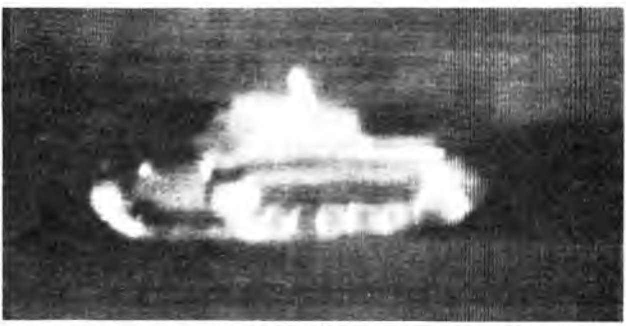


Bild 618. *Wärmebild eines Kampfpanzers, bei Nacht aus 250 m Entfernung aufgenommen (Eltro, Heidelberg).*

Wärmebildgeräte arbeiten passiv, sind unabhängig von der Beleuchtung und somit Tag und Nacht einsetzbar.

6.3.4.5. Die Lasertechnik

Die Technik der Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung von bewegten Objekten mit einem Laserstrahl ist erst in den Jahren nach 1965 entwickelt worden, sie hat aber sogleich Anwendung im militärischen Bereich gefunden.

Das physikalische Prinzip des Lasers (Light amplification by stimulated emission of radiation) ist nichts anderes als das der Verstärkung elektromagnetischer Wellen im Wellenlängenbereich des Lichtes. Zu eingehender Information sei auf die Fachliteratur verwiesen [10], [11].

Die Laser-Meßtechnik bietet für die Lösung militärischer Aufgaben folgende Vorteile:

Handlichkeit der Apparatur; ein Laser-Entfernungsmeßgerät läßt sich ohne große Mühe von einem Artilleriebeobachter tragen oder ohne Schwierigkeit als Feuerleitgerät auf einem Panzer mitführen.

Eine Ortung durch den Gegner ist praktisch nicht möglich, da der Laserstrahl wegen seiner geringen Divergenz nur im Ziel direkt bemerkt bzw. bei zusätzlicher Anwendung eines Infrarot-Lasers nur von einem geeigneten Aufnahmegerät registriert werden kann.

Praktisch sofortiges Meßergebnis; die vollautomatische Auswertung ermöglicht die Darstellung des Meßergebnisses in weniger als einer Sekunde nach Weitergabe an das Feuerleitsystem.

Bei dem für militärische Zwecke benutzten Verfahren der Messung der Impulslaufzeit wird vom Lasersender ein kurzer, intensiver Lichtimpuls (Impulsdauer 1 bis $5 \cdot 10^{-8}$ s, Impulsleistung bis 10^7 W) auf das anzumessende Objekt gerichtet und die Zeit t zwischen dem Aussenden und dem Empfangen des vom Objekt diffus reflektierten Impulses gemessen. Der Abstand L des Objektes von Sender und Empfänger (die eine Einheit bilden) ergibt sich aus der Beziehung

$$L = \frac{1}{2} ct,$$

worin c die Lichtgeschwindigkeit bedeutet.

Bei der Bestimmung der Geschwindigkeit eines sich bewegenden Objektes wird die Messung im Rahmen der zur Verfügung stehenden Zeit in kurzen Zeitabständen mehrmals hintereinander ausgeführt und dabei aus den Entfernungs- und Richtungsdifferenzen die Geschwindig-

keit und die Bahn des Objektes mit einem elektronischen Rechner bestimmt.

Die typische militärische Anwendung der Laser-Entfernungsmeßtechnik liegt auf folgenden Gebieten:

Artilleriefeuerleitung. Die vom Beobachter ermittelten Meßergebnisse werden als Ortskoordinaten des Zieles an eine Kommandostelle gegeben.

Panzerfeuerleitung. Das Ziel wird optisch anvisiert und die mit dem Laser-Entfernungsmesser (LEM) gemessenen Daten werden an einen Rechner weitergegeben, von wo aus das Geschütz über ein elektromechanisches System auf das Ziel gerichtet wird.

Flugabwehr. Ein Zielverfolgungsgerät wird mit dem LEM kombiniert, aus den laufend gemessenen Daten wird die Bahnkurve des Ziels berechnet und an das Richtsystem des Geschützes weitergegeben.

Flugzeugfeuerleitung. Es gleicht dem System der Flugabwehr, nur muß Bahn und Geschwindigkeit des Flugzeuges in die Rechnung einbezogen werden.

6.4. Das Stabilisieren

Beim Horizontieren (vgl. Abschnitt 6.2.3) wird die zeitweilige Schieflage (Verkantung) eines Geschützes oder seiner Zieleinrichtung durch Ausrichten nach dem Horizont ausgeglichen.

Ist dagegen die Geschützunterlage ständigen Schwankungen unterworfen, wie es bei Schiffen fast immer und bei Fahrzeugen (Panzern) während des Fahrens der Fall ist, so sind andere Maßnahmen notwendig, um das Geschütz oder die Zieleinrichtung im Raum stabil zu halten. Dieses Unabhängigmachen von den Schwankungen nennt man Stabilisieren.

6.4.1. Das Stabilisieren auf Schiffen

Zum Stabilisieren von Waffen und Geräten auf Schiffen kennt man schon lange Mittel und Wege, um die verhältnismäßig langsamen und meist gleichmäßigen Schiffsschwankungen auszugleichen. Der natürliche Horizont (die Kimm) oder die Mutterkreiselanlage liefern die Werte dazu; Koordinatenwandler besorgen unter Zwischenschaltung von Rechenwerken für die Berücksichtigung der verschiedenen Korrekturwerte die Umrechnung der Erd- in Schiffskoordinaten und umgekehrt.

So stand z.B. der Flakleitstand der Kreuzer der K-Klasse (Köln, Königsberg usw.) auf einer schwingenden Plattform, an deren Entwick-

lung Rheinmetall seinerzeit beteiligt war. Die Stabilisierung erfolgte dadurch, daß die Werte für Schlingern, Stampfen und Gieren von der Kreiselanlage abgegriffen und mittels elektrischer Antriebe auf die Plattform als Rückdrehwerte übertragen wurden. Die kardanisch gelagerte Plattform wurde dadurch „erdfest", und das darauf befindliche 6-m-Richt- und -Entfernungsmeßgerät konnte (die translatorischen Bewegungen des Schiffes nicht gerechnet) wie ein Flakleitgerät auf dem Lande richten und die Vorhalte im Erdsystem ermitteln, die dann im Rechengerät auf der Plattform direkt verarbeitet wurden. Ein mechanischer Koordinatenwandler im Drehmittelpunkt des Kardangelenkes der Plattform wandelte sodann die zweiachsigen Erdkoordinaten in dreiachsige Schiffskoordinaten und gab sie elektrisch an die dreiachsige Flak.

Später wurde nur noch das Richt- und Entfernungsmeßgerät stabilisiert und das Rechnen und die Koordinatenwandlung in schiffsfesten Geräten vorgenommen.

6.4.2. Das Stabilisieren im Panzer

Bei einer auf Fahrzeugen, insbesondere auf Panzern lafettierten Waffe sind die Amplituden und insbesondere die Frequenzen für die Verkantung, das Nicken und das Gieren wesentlich größer als bei Schiffslafetten, so daß hier eine Stabilisierung wesentlich aufwendiger ist [12].

Der im Panzer zur Verfügung stehende Raum und das zulässige Gewicht setzen andererseits enge Grenzen. Da aber die Treffwahrscheinlichkeit eines fahrenden nichtstabilisierten Panzers nur sehr kleine Werte erreicht, ist die Stabilisierung jedenfalls anzustreben.

Der wesentliche Vorteil der Stabilisierung besteht zunächst darin, daß der Richtschütze das Ziel in der Bewegung aufklären und durch Grobrichten erfassen sowie die Zielentfernung messen kann. Die im „Feuerhalt" bis zum ersten Schuß sonst erforderliche Zeit wird verkürzt und praktisch nur noch auf ein Feinrichten beschränkt. Selbstverständlich kann auch in der Bewegung geschossen werden. Durch die Verringerung der Haltezeiten des Panzers verringert sich für ihn die Wahrscheinlichkeit, getroffen zu werden. Im wesentlichen werden zwischen drei verschiedenen Verfahren der Stabilisierung unterschieden:

Stabilisieren der Zieloptik und Nachführen der Waffe mit Hilfe eines entsprechenden Regelantriebs.

Stabilisieren von Zieloptik und Waffe gemeinsam.

Zielbezogene Stabilisierung. Optik und Waffe bleiben stets – auch bei Relativbewegungen – auf das Ziel gerichtet. Diese Lösung erfordert

jedoch einen erheblichen technischen Aufwand; sie befindet sich z.Z. noch in der Entwicklung.

Eine zweiachsige Stabilisierungsanlage arbeitet nach folgendem Prinzip: Die Winkeländerungen einer Kanone werden in Seite und Höhe durch integrierende Kreisel erfaßt. Aus den Kreiselsignalen werden Befehlssignale abgeleitet, die den Richtantrieben zugeleitet werden, so daß jede eintretende Abweichung sofort korrigiert und die Sollrichtung im Raum wiederhergestellt wird. Hierbei wird die selbststabilisierende Wirkung der Massenträgheit von Turm und Kanone im größtmöglichen Maße ausgenutzt.

6.5. Übungsgeräte

Für die Ausbildung der Truppe im „Zielen und Richten" werden mit Vorteil Übungsgeräte eingesetzt, mit denen einmal Ziele und Gefechtssituationen simuliert und zum anderen die waffenseitigen Einrichtungen zum Zielen und Richten in ihrer Anordnung und Bedienungscharakteristik dargestellt werden können.

Der Aufbau solcher Übungsgeräte sei am Beispiel des „Dome-Trainers" für die Ausbildung von Fla-Bedienungen erläutert. Diese Anlage besteht aus einem sogenannten Schießkino, in das eine entsprechende Richtübungslafette eingebracht wird.

Dieses „Schießkino"[1] ähnelt einem Zeißschen Planetarium: Im Mittelpunkt einer aufblasbaren und unter leichtem Überdruck stehenden halbkugelförmigen Zeltkuppel (es gibt zwei Größen von 12 und 17 m Grundflächendurchmesser) steht ein Projektor, der Filme von Originalflügen an die Kuppelwand projiziert. Ein gelber Punkt zeigt den richtigen Vorhalt an, der im Gerät laufend berücksichtigt wird. Um zur Gewöhnung der Übenden möglichst naturgetreue Verhältnisse nachzubilden, können auch Kampfgeräusche, Flugzeuglärm und Geschoßknalle von einem Tonband abgespielt werden.

Hinter dem Zielprojektor steht eine Richtsäule — wie im Originalgerät der Firma R.F.D. — oder die Richtübungslafette, an der ausgebildet werden soll.

Der Schütze richtet das sich bewegende Ziel unter Berücksichtigung der aus der Zielbewegung ermittelten Vorhaltekorrekturen an. Der Fadenkreuzprojektor anstelle des Geschützrohres zeigt die Lage des Treffpunktes auf der Kuppelwand an. Mit Hilfe des gelben Punktes, der für den Richtschützen durch eine besondere Brille unsichtbar gemacht ist, kann der danebenstehende Ausbilder die Trefferlage kontrollieren. Ein

---

1) Hersteller: R.F.D. Company Ltd., Godalming (England).

Taktgeber simuliert die Waffenkadenz. Unter Zwischenschaltung eines Zähl- und Schreibwerkes werden die Treffer registriert. Die Abweichung zwischen Projektionsachse und Geschützachse wird im R.F.D.-Gerät und im Film berücksichtigt.

Als Beispiel für eine *Richtübungslafette,* die als Simulator für die Panzerflak Pz Flak 40 mm ZwSF M42 hauptsächlich zur Verwendung im „Dome-Trainer" dient, sei die von Rheinmetall gebaute Richtübungslafette Rh-Ül M 42 (Bild 619) angeführt.

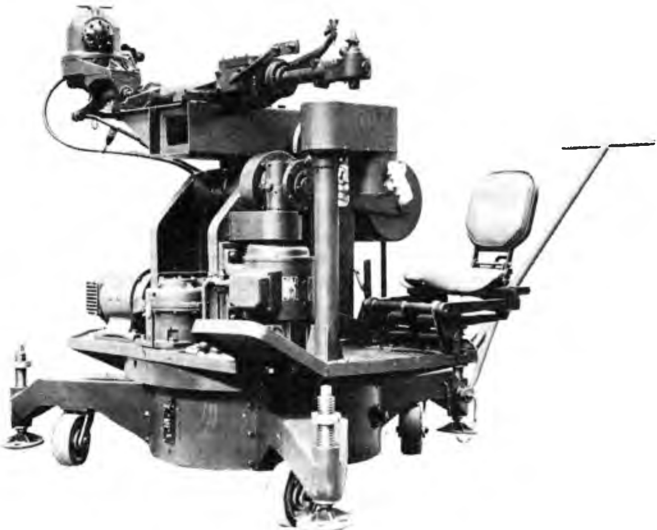


Bild 619. *Richtübungslafette Rh-Ül M 42.*

Der dreibeinige Untersatz stellt das Fahrzeug SFM 42 dar, die Oberlafette ist Ersatz für den Turm. Unter Verwendung des Originalvisiers mit der gleichen Anordnung des Richtsitzes und dem gleichen Nackendrehpunkt für den Richtschützen entspricht sie auch bezüglich der Steuerhandgriffe und deren Lage sowie auch ihrer Winkelausschläge für die Richtgeschwindigkeiten vollkommen dem Original. Anstelle der Waffe ist ein R.F.D.-Schießprojektor und eine Fotozelle eingebaut.

Literatur

|1| Waninger, C.; Füsgen, P.: Das Richten der Geschütze. Berlin 1938, VDI-Verlag.

|2| Gaertner, H.: Aufklärungstechnik, Teil I. Jahrb. d. Wehrt 1 (1966), S. 42.

|3| Kuhlenkamp, A.: Flak-Kommandogeräte. Berlin 1943, VDI-Verlag.

|4| Buchmüller, F.W.: Die „Super-Fledermaus". Soldat und Technik 5 (1962), Nr. 9, S. 484.

|5| Gaertner, H.: Aufklärungstechnik, Teil II b. Jahrb. d. Wehrt. 3 (1968), S. 66.

|6| Gaertner, H.: Die Bedeutung der infraroten Strahlen für militärische Verwendungszwecke. Wehrt. Monatsh. 58 (1961), S. 530; 59 (1962), S. 141, S. 190.

|7| Siebecker, H.; Wedel, N.: Nachtsichtgeräte beim Heer. Jahrb. d. Wehrt. 5 (1970), S. 60; 6 (1971), S. 64; 7 (1973), S. 40.

|8| Siebecker, H.: Technische Möglichkeiten für Zielaufklärung und Zielvermessung bei gepanzerten Fahrzeugen. Wehrtechnik 1975, S. 60.

|9| Gaertner, H.: Nachtsichttechnik. Wehrtechnik 1975, S. 314; 1975, S. 389.

|10| Mollwo, E.; Kaule, W.: Maser und Laser. BI-Hochschultaschenbücher Nr. 79/79 a; Mannheim: Bibliographisches Institut 1965.

|11| Hess, W.: Laser-Entfernungsmesser. Technik und Versorgung 1968, S. 132.

|12| Müller, G.: Stabilisierung der Waffenanlage des Kampfpanzers. Jahrb. d. Wehrt. 2 (1967), S. 78.

7. Automatische Schußwaffen

Unter der Bezeichnung „automatische Schußwaffen" oder auch „Maschinenwaffen" versteht man Rohrwaffen, mit denen durch einmalige Betätigung des Abzuges „Dauerfeuer", d.h. eine ununterbrochene Serie von Schüssen abgegeben werden kann, wobei alle erforderlichen Funktionsvorgänge selbsttätig erfolgen. Die für das Zuführen der Munition, das Laden der Waffe und das Auswerfen der leeren Patronenhülsen notwendige Energie wird dabei entweder der Schußenergie entnommen (dieser Fall ist vorwiegend) oder auch von außen zugeführt.

Automatische Waffen sind

Maschinenpistolen,
Sturmgewehre,
Maschinengewehre und
Maschinenkanonen.

Eine wichtige Kenngröße automatischer Waffen ist die Kadenz oder Schußfolge, das ist die Anzahl der Schüsse, die die Waffe ohne Unterbrechung in einer Minute verschießen würde.

Die erste Maschinenwaffe im obigen Sinne, zugleich das erste einsatzfähige Maschinengewehr, war das MAXIM-MG aus dem Jahre 1883.

Neben den automatischen gibt es noch sogenannte halbautomatische Waffen; darunter versteht man solche, die wie bei den Automaten alle Funktionen bis auf die Abfeuerung selbsttätig ausführen und bei denen nur diese für jeden Schuß betätigt werden muß (Selbstladegewehre, Revolver und Pistolen). Bei Geschützrohren spricht man von halbautomatischen Verschlüssen, wenn das Schließen und Öffnen des Verschlusses sowie das Auswerfen der Hülse selbsttätig ablaufen.

Oft findet man bei automatischen Waffen die Begriffe „zuschießende Waffe" und „aufschießende Waffe". In einer *zu*schießenden Waffe (auch offene Waffe genannt) steht bei der Schußunterbrechung der Verschluß offen; es ist keine Patrone im Rohr. Eine *auf*schießende Waffe (auch geschlossene Waffe gananntl) ist bei Schußunterbrechung geladen; der Verschluß befindet sich in Verriegelungsstellung. Waffen, die in rascher Folge viele Schüsse verfeuern sollen, müssen aus Sicherheitsgründen *zu*schießende sein (Gefahr der Selbstzündung).

7.1. Einteilung der automatischen Schußwaffen

Im Laufe der Entwicklung automatischer Schußwaffen hat sich folgende Systemeinteilung ergeben:

1. Massenverriegelte Waffen,
2. Rückstoßlader (Rohrrückstoßlader),
3. Gasdrucklader,
4. Halbstarrverriegelnde Waffen, auch Waffen mit übersetztem Masseverschluß genannt,
5. Trommelwaffen (Revolverkanonen),
6. Waffen mit Fremdantrieb der Verschlußelemente.

Eine **massenverriegelte automatische Waffe** ist eine solche, bei der allein die Trägheitswirkung eines schweren Verschlusses eine Quasiverriegelung garantiert; das heißt: Die Verschlußmasse ist so groß, daß der während der Schußentwicklung über den Hülsenboden auf den Verschluß wirkende Gasdruck diesen zunächst nur um einen so kleinen Weg nach hinten bewegt, daß die entsprechend ausgelegte Hülse nicht überbeansprucht wird.

Vorteile: Einfachster Waffenaufbau, keine Verriegelungsteile und Gaskanäle, feststehendes, für starren Einbau[1]) geeignetes Rohr.

Nachteile: Schwerer Verschluß, geringe Kadenz bei größerem Kaliber, besondere Patronenhülsen notwendig, kein Verschuß von Hochleistungsmunition möglich.

Anwendung: Maschinenpistolen, früher auch Maschinenkanonen bis 30 mm Kaliber.

Rückstoßlader sind automatische Waffen, bei denen Rohr und Verschluß durch den Gasdruck angetrieben zunächst gemeinsam fest verriegelt zurücklaufen, sich dann trennen, wobei durch Schleuderung eine Nachbeschleunigung des Verschlusses stattfindet. Der Rohrrückstoß wird oft durch einen Rohrrückstoßverstärker verstärkt.

Vorteile: Sichere Verriegelung, leichtes Verschlußgewicht, gleichmäßiges Schießen, erhöhte Kadenz, Verschuß aller Munitionen.

Nachteile: Rücklaufendes Rohr, Kadenzbeschränkung nach oben, besonders bei großen Kalibern, zweiteiliger Verschluß, Konstruktion aufwendiger.

Anwendung: Bei allen Kalibern.

Beim **Gasdrucklader** wird Gas aus dem Rohr entnommen, mit dessen Hilfe die Entriegelung bewirkt und dem Verschluß oder einem Steuerschieber ausschließlich oder zusätzlich die notwendige Rücklaufenergie zugeführt wird.

Vorteile: Sichere Verriegelung, hohe Kadenz, für alle Kaliber anwendbar, meist feststehendes Rohr, leichter Verschluß.

---

[1]) S. 7.6, Lagerung automatischer Waffen.

Nachteile: Gesonderte Gasleitung, Gaskolben, mehrteiliger Verschluß.

Anwendung: Vom automatischen Gewehr bis zur Maschinenkanone.

Halbstarrverriegelnde Waffen, auch Waffen mit übersetztem Masseverschluß genannt, sind Waffen mit einer Quasiverriegelung, die sich beim Gasdruckanstieg zu lösen beginnt, aber durch Übersetzung einer Teilmasse des Verschlusses so verzögert, daß eine genügende „Quasiverriegelungszeit" gewährleistet ist.

Vorteile: Wie bei den massenverriegelnden Systemen, leichter, jedoch komplizierterer Verschluß.

Nachteile: Verhütung des Verschlußrücksprungs notwendig.

Anwendung: Automatische Gewehre und Maschinengewehre, Kalibergrenze nach oben noch offen.

Trommelwaffen (Revolverkanonen) benutzen das Revolverpistolenprinzip (vom Rohr unabhängige, durch Gasantrieb sich drehende Trommel mit mehreren Patronenlagern).

Vorteile: Sehr hohe Kadenz möglich, kurze Bauweise aufgrund des feststehenden Verschlusses.

Nachteile: Begrenzte Schußzahl im Einsatz wegen der Gefahr der Selbstzündung durch Trommel- oder Rohrwärme; wegen hoher Kadenz geringe Rohrlebensdauer.

Anwendung: Flugzeugbordkanonen.

Bei den **Waffen mit Fremdantrieb** ist das „Gatling"-System das bekannteste; es ist ein elektromotorisch angetriebenes Rohrbündel mit zwangsläufig, vom Schuß unabhängig gesteuerten Verschlüssen, Zuführ- und Auswurfvorrichtungen.

Vorteile: Kadenzvervielfachung ohne erhöhte Rohrabnutzung.

Nachteile: Fremdenergie notwendig; mangelnde Sicherheit bei Zündverzögerungen.

Anwendung: Bordkanonen.

Die vorgenannte Klassifikation der Waffen ist nicht unumstritten, denn letztlich ist jede nicht fremdangetriebene Waffe ein Gasdruck- *und* Rückstoßlader. Da also keine genauen Definitionen gegeben sind, kommt es vor, daß einzelne Waffen in der Literatur verschieden eingruppiert sind.

In Bild 701 ist ein Schema für die Einteilung der automatischen Schußwaffen angegeben, in dem die verschiedenen Kriterien jeweils gegenübergestellt sind.

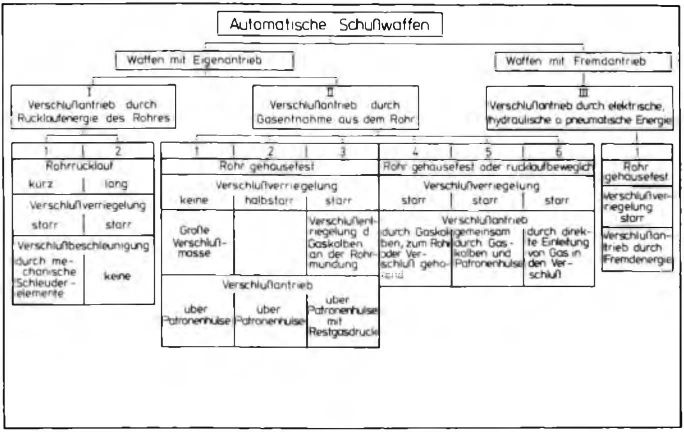


Bild 701. *Einteilung der automatischen Schußwaffen.*

7.2. Funktionsvorgänge an einer automatischen Waffe

Bild 702 zeigt in vereinfachter Darstellung den grundsätzlichen Aufbau einer Maschinenkanone, und zwar den eines Gasdruckladers (II 3 in Bild 701). Für die Einzelteile sind gebräuchliche Bezeichnungen, ggf. mehrere angegeben.

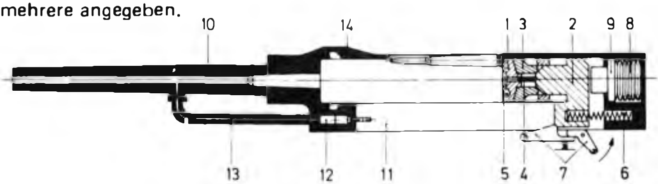


Bild 702. *Gasdrucklader.*

1 Verschluß, Verschlußkopf
2 Verriegelungsschieber, Verschlußträger, Verschlußgehäuse
3 Stützriegel, Stützklappe oder, je nach Form des Verriegelungselementes, Verriegelungsrolle, -walze, -keil-, -kämme
4 Schlagbolzen, Schlagstift, Zündstift
5 Auszieher
6 Schließfeder
7 Abzug
8 Verschlußpuffer
9 Pufferkopf, Pufferteller, Pufferstößel
10 Rohr
11 Waffengehäuse
12 Gaskolben, Entriegelungskolben
13 Gaskanal
14 Verriegelungsstück

Teile 1 bis 5 bilden den Verschluß. Nicht eingezeichnet sind: Munitionszuführeinrichtung und Ausstoßer bzw. Auswerfer.

Die Bildreihe 703 a bis f macht den Funktionsablauf bei diesem Waffenaufbau deutlich.

a) Der durch den Abzug festgehaltene Verschluß wird durch die angedeutete Betätigung des Abzuges freigegeben.

b) Die zuvor gespannte Schließfeder treibt den Verschluß nach vorne und schiebt eine in Ladestellung liegende Patrone in den Ladungsraum (das Patronenlager).

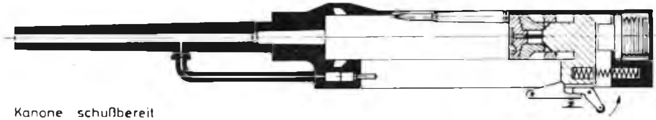
c) Der Verschlußkopf hat die vorderste Stellung erreicht (Rohranschlag); der mit dem Verschlußkopf längsverschiebbar verbundene Verriegelungsschieber hat die Stützriegel in die im Verriegelungsstück befindlichen Verriegelungsnuten gedrückt; der mit dem Verriegelungsschieber verbundene Schlagbolzen bewegt sich nach vorne und zündet die Patrone.

d) Durch den entstehenden Gasdruck in der Patronenhülse wurde das Geschoß durch das Rohr getrieben. Gas strömt durch den Gaskanal und bewegt den Gaskolben nach hinten, der seinerseits den Verriegelungsschieber zurückstößt. Die Hinterstellung der Stützriegel ist aufgehoben; durch den über den Patronenboden auf den Stoßboden des Verschlußkopfes wirkenden Restgasdruck im Rohr bewegen sie sich über die Schrägflächen nach innen und heben die Verriegelung auf.

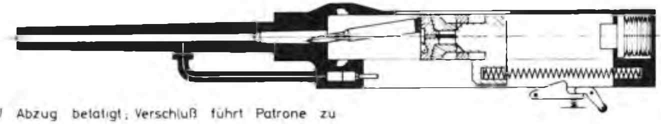
e) Der Verschluß ist zurückgelaufen, hat die Patronenhülse mittels Auszieher mitgenommen, spannt die Schließfeder und bringt eine neue Patrone in Zuführstellung; die leere Hülse läuft gegen einen Ausstoßer, wird über die Auszieherkralle gekippt und ausgeworfen.

f) Der Verschluß läuft auf den Puffer. Wurde der Abzug inzwischen losgelassen, fängt er den Verschluß; wurde er weiter durchgezogen gehalten, wiederholt sich automatisch der Ablauf b bis f mit einer durch die freiwerdende Energie des Puffers gegenüber dem ersten Schuß erhöhten Vorlaufgeschwindigkeit.

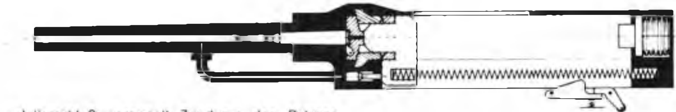
Bild 704 zeigt den Zeit-Weg-Ablauf von Verschlußkopf, Verriegelungsschieber und Pufferteller sowie des Waffengehäuses mit Rohr des Gasdruckladers nach Bild 702 und 703.



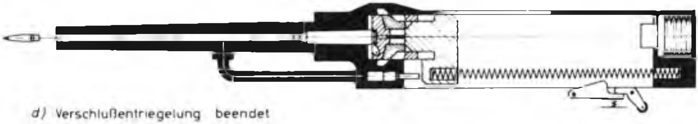
a) Kanone schußbereit



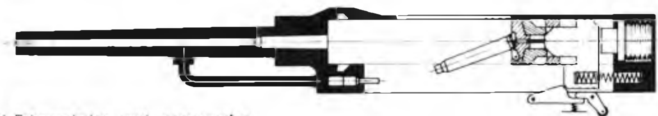
b) Abzug betätigt; Verschluß führt Patrone zu



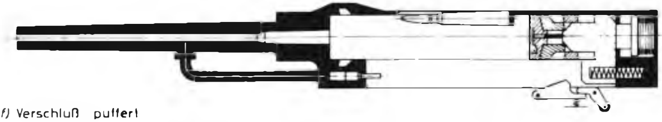
c) Verschluß verriegelt, Zündung der Patrone



d) Verschlußentriegelung beendet



e) Patronenhülse wird ausgeworfen



f) Verschluß puffert
Neue Patrone in Zuführstellung

Bild 703. *Funktionsablauf eines Gasdruckladers nach Bild 702.*

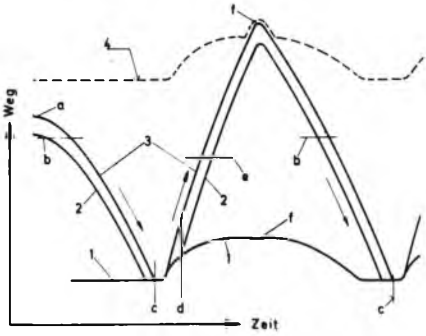


Bild 704. *Zeit-Weg-Diagramm zum Funktionsablauf des Gasdruckladers nach Bild 703.*

1 Waffengehäuse mit Rohr
2 Verschluß
3 Verriegelungsschieber
4 Pufferteller

a bis f entsprechen den Funktionsabläufen gemäß Bild 703

7.3. Beispiele automatischer Schußwaffen und deren Funktionsablauf

Im folgenden werden einige Beispiele von automatischen Schußwaffen beschrieben.

Bild 705 zeigt die 30-mm-Maschinenkanone MK108, eine von Rheinmetall während des Zweiten Weltkrieges gebaute und als Flugzeugbordkanone eingesetzte *massenverriegelte* Waffe (II 1 in Bild 701).



Bild 705. *Maschinenkanone MK 108.*

In der schematischen Verschlußzeichnung Bild 706 ist die Stellung der Funktionskomponenten kurz vor Beendigung des Verschlußvorlaufes bzw. kurz vor der Zündung dargestellt.

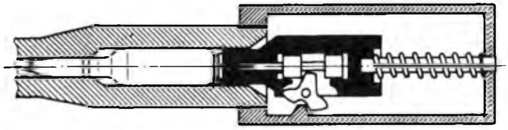


Bild 706. *Prinzipskizze eines massenverriegelten Verschlusses.*

Das Zeit-Weg-Diagramm des Verschlusses ist in Bild 707 gezeichnet.

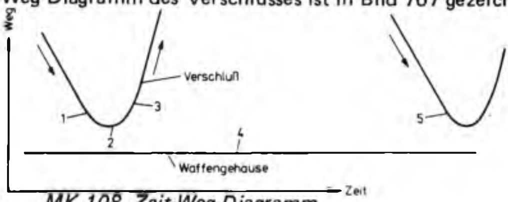


Bild 707. *MK 108, Zeit-Weg-Diagramm.*

1 Zündung bei noch vorlaufendem Verschluß (Vorlaufzündung)
1-2 Verschlußverzögerung durch Gasdruckanstieg im Rohr
2-3 Verschlußbeschleunigung nach hinten durch Gasdruck im Rohr
4 Waffengehäuse bei starrer Lagerung
5 Folgeschuß, wie 1

Als Beispiel eines *Rückstoßladers* (Rohrrückstoßladers) ist in Bild 708 das Maschinengewehr MG 3 gezeigt (II 1 in Bild 701). Das MG 3, Kal. 7,62 mm, ist eine Rheinmetall-Weiterentwicklung des im Zweiten Weltkrieg bewährten MG42, der ersten in Blechprägetechnik hergestellten Waffe.



Bild 708. *Maschinengewehr MG 3.*

Bild 709 zeigt den Verschlußaufbau mit den Einzelteilbezeichnungen.

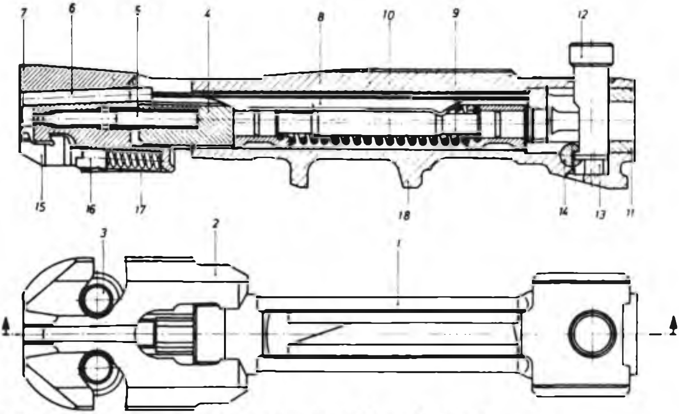


Bild 709. *MG 3, Bezeichnung der Verschlußteile.*

1 Verschlußgehäuse
2 Verschlußkopf
3 Verriegelungsrollen
4 Schiagbolzenhalter
5 Schlagbolzen
6 Auswerfer
7 Zuführnase
8 Auswerferstange
9 Verschlußsperre
10 Feder zur Verschlußsperre
11 Auswerferbuchse
12 Federnder Rollenbolzen
13 Federbolzen zum Rollenbolzen
14 Haltebolzen
15 Auszieher
16 Druckbolzen
17 Ausziehe rfeder
18 Verschlußabzugraste

In den Bildern 710 bis 712 ist der Verschluß in verriegelter, entriegelnder und entriegelter Stellung gezeigt.

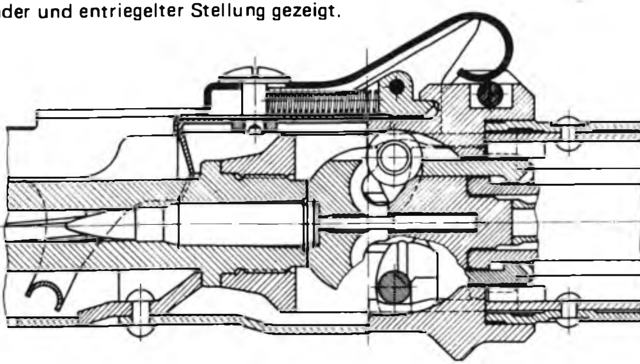


Bild 710. *MG 3, Verschluß verriegelt; s. Punkt 2 in Bild 713.*

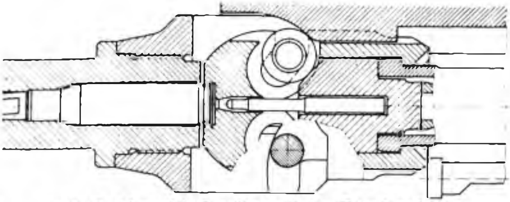


Bild 711. *MG 3, Verschluß während der Entriegelung.*

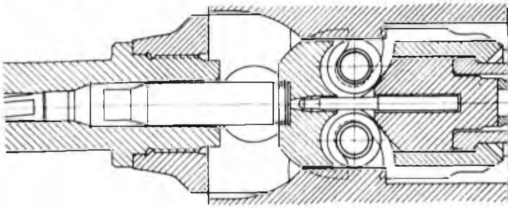


Bild 712. *MG 3, Verschluß entriegelt, Rohranschlag hinten; s. Punkt 6a in Bild 713.*

Bild 713 ist das Zeit-Weg-Diagramm von Verschlußkopf, Verschlußgehäuse, Rohr und Waffengehäuse.

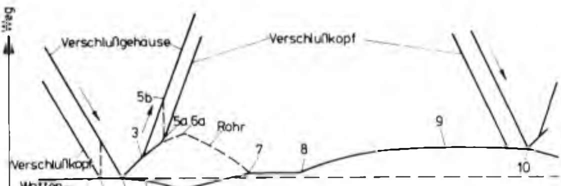


Bild 713. *MG 3, Zeit-Weg-Diagramm.*

1 Verschlußkopf hat vorderste Stellung erreicht
1-2 Verschlußgehäuse läuft weiter nach vorne und verriegelt mit Rollen über den Schlagbolzenhalter
2 Verschlußgehäuse hat vorderste Stellung erreicht; Zündung
2-3 Starrverriegelter Rohr-Verschluß-Rücklauf
3 Schleuderung des Verschlußgehäuses
3-5a Entriegelung des Verschlußkopfes
5b Verschlußkopfmitnahme durch Verschlußgehäuse
2-6a Rohrpufferung auf Rohrvorholfeder
4 Waffengehäuse läuft durch Wirkung des Rückstoßverstärkers nach vorne

6a Hinterer Rohranschlag im Waffengehäuse
6b Rückwärtsbewegung des Waffengehäuses als Folge von 6a
7 Rohr beendet Vorlauf durch Aufschlag auf Waffengehäuse
8 Wirkung des Verschlußpufferstoßes auf das Waffengehäuse
9 Waffenbewegung kehrt um durch Feder in der Lafette oder Schulterkraft des Schützen
10 Folgeschuß, wie 2

Ein Vertreter der *halbstarrverriegelnden* Systeme (II 2 Bild 701) ist das Gewehr G3, Kal. 7,62 mm, Bild 714.



Bild 714. *Gewehr G 3.*

Die Bilder 715 und 716 zeigen den Verschluß in verriegelter und entriegelter Stellung.

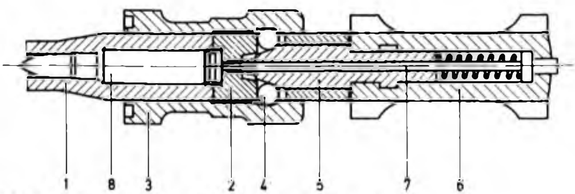


Bild 715. *Gewehr G 3, Verschluß verriegelt.*

1 Rohr
2 Verschlußkopf
3 Verriegelungsstück
4 Rolle
5 Steuerstück
6 Verschlußträger
7 Schlagbolzen
8 Patrone

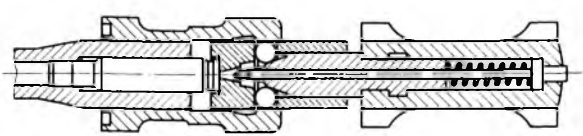


Bild 716. *Gewehr G 3, Verschluß entriegelt.*

Bild 717 zeigt die Verschluß- und Gehäuse-Zeit-Weg-Diagramme des Gewehrs G 3.

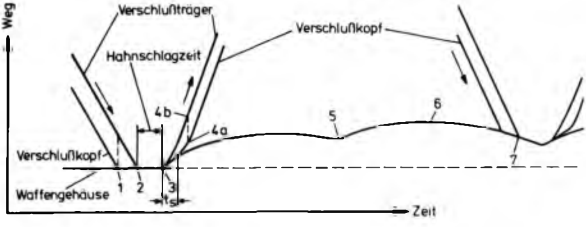


Bild 717. *Gewehr G 3, Zeit-Weg-Diagramm.*

1u.2 Vorderste Stellung des Verschlußkopfes und des Verschlußträgers wie beim MG 3, Bild 713
2-3 Hahnschlagzeit
3 Zündung, Beginn des Verschlußträgerrücklaufs und des ihm gegenüber verzögerten Verschlußkopfrücklaufs
4a Vollkommene Entriegelung (t_s = Quasiverriegelungszeit)
4b Verschlußkopfmitnahme durch den Verschlußträger
5 Pufferstoßwirkung auf das Waffengehäuse
5-7 Widerstandswirkung der Schulterkraft des Schützen
7 Folgeschuß, wie 2

Das G 3 erfüllt auch die Funktionen eines halbautomatischen Gewehres.

Bild 718 zeigt die 20-mm-Maschinenkanone MK 20-1, einen *Gasdrucklader* oder nach der Einteilung in Bild 701 eine Waffe der Gattung II 5. Sie wird als Bordwaffe in Fahrzeugen, Flugzeugen und Feldlafetten eingebaut. Im wesentlichen entsprechen Aufbau und Funktion der unter 7.2. beschriebenen Waffe.



Bild 718. *Maschinenkanone MK 20-1.*

Zur gleichen Waffengattung gehört die von Rheinmetall neu entwickelte Maschinenkanone MK 20 Rh 202, Kal. 20 mm, Bild 719.



Bild 719. *Maschinenkanone MK 20 Rh 202.*

Diese Waffe zeichnet sich insbesondere durch folgende Merkmale aus:

Niedrige Kräfte auf den Waffenträger (schwimmende Lagerung, s. 7.6),
Munitionszuführung durch Gasantrieb, von Verschluß und Kanonenrücklauf unabhängig,
Munitionszuführung von rechts, links und oben möglich,
in allen Zuführmöglichkeiten gleiche Gurtung,
Munitionswechsel in Sekunden möglich,
vom Schmierzustand unabhängige Funktionen,
Zerlegbarkeit ohne Werkzeuge,
große Lebensdauer.

Bild 720 ist das Zeit-Weg-Diagramm, das in der Gehäusebewegung von Bild 704 abweicht (schwimmende Lagerung gegenüber gepufferter Lagerung).

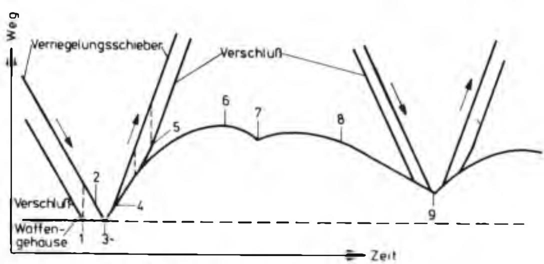


Bild 720. *MK 20 Rh 202, Zeit-Weg-Diagramm.*

In Bild 721 ist eine in Frankreich gebaute 30-mm-Trommelkanone D.E.F.A. im Längsschnitt dargestellt. *Trommelkanonen* (Revolverkanonen) wurden im Zweiten Weltkrieg von den Mauserwerken entwickelt und später in verschiedenen Ländern weiterentwickelt und gebaut.

Der Mechanismus der Trommelkanone ist von den bisher beschriebenen Arten so verschieden, daß im folgenden etwas näher darauf eingegangen werden soll (Bild 722).

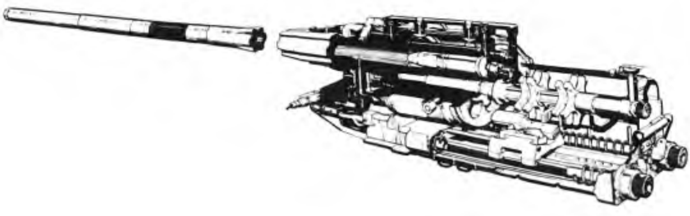


Bild 721. *30-mm-Trommelkanone D.E.F.A. Typ 552.*

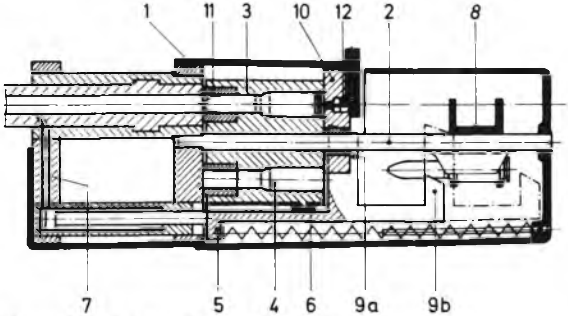


Bild 722. *Prinzip einer Trommelkanone.*

In einem Trommelgehäuse 1 ist auf einer Achse 2 eine Trommel 3 mit mehreren (fünf) Patronenlagern 4 gelagert. Unterhalb der Trommel befindet sich ein längsverschieblicher Steuerschieber 5 mit einer Steuerkurve, in die jeweils einer der am Trommelumfang angebrachten Rollenbolzen 6 eingreift; dieser dreht beim Rück- und Vorlauf des Steuerschiebers die Trommel jeweils um eine Patronenlagerteilung weiter. Der Steuerschieber wird wie bei einem Gasdrucklader durch vom Rohr über einen Gaskanal 7 abgezweigte Pulvergase angetrieben. Auf der nach hinten verlängerten Trommelachse sitzen Sternräder 8, die sich mit der Trommel drehen und gegurtete Munition in die Ladestellung fördern. Die mit dem Steuerschieber gekuppelten zwei Zuführstößel 9a und 9b laden die Trommel in zwei Ladeschritten so, daß jeweils erst innerhalb zweier Schüsse eine Patrone voll in das Patronenlager eingeführt ist. Am Ende eines einem Schuß entsprechenden Schaltschrittes der Trommel hat sich das mit der Patrone geladene Patronenlager vor eine feste Wand 10 des Trommelgehäuses gedreht, wodurch der „Verschluß" hergestellt ist. Die Gasabdichtung zwischen Trommel und Rohr beim Abschuß wird durch eine Dichtbuchse 11 bewirkt. Im Verschlußteil befindet sich die elektrische Zündvorrichtung 12 zum Zünden der Patrone. Die leere Patronenhülse wird aus dem

danebenliegenden Patronenlager durch einen ebenfalls schiebergesteuerten Auswerfer nach hinten ausgeworfen.

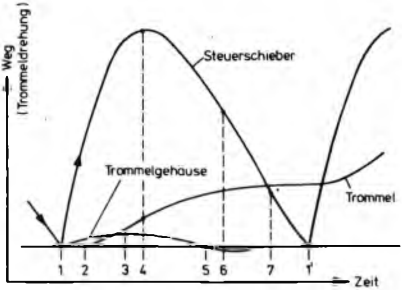


Bild 723. *Trommelkanone, Zeit-Weg-Diagramm.*

In Bild 723 ist der Zeit-Weg-Verlauf von Steuerschieber, Trommel und Trommelgehäuse graphisch dargestellt. Zum besseren Verständnis sind in der nachfolgenden Erklärung der Punkte 1 . . . 1' des Diagramms die Patronenlagerstellungen im Uhrzeigersinn durchnumeriert, sie beginnen in der Abschußstellung mit Stellung 1. Ein Patronenlager wechselt also nach jeweils einem Schaltschritt der Trommel (72°) seine Stellungsnummer.

1 Der Steuerschieber befindet sich in vorderster Stellung, die Trommel ist in Ruhe. In dem mit dem Rohr gleichachsigen Patronenlager (Stellung 1) erfolgt die Zündung. Beginn des Rücklaufs von Steuerschieber und Trommelgehäuse.

2 Die Trommel und mit ihr die Sternräder der Gurtzuführung beginnen sich zu drehen.

3 Das Trommelgehäuse hat auf der Rücklaufeinrichtung in dem starr eingebauten Waffengehäuse den maximalen Rücklauf erreicht.

4 Der Rollenbolzen läuft aus der Steuerkurve, der nächste Rollenbolzen läuft ein. Der Steuerschieber kehrt seine Bewegungsrichtung um und beginnt infolge der Trägheitswirkung der Trommel den Vorlauf, wobei er durch die Schließfederkraft unterstützt wird.

5 Das Trommelgehäuse hat die Ausgangsstellung erreicht und schwingt leicht nach vorne durch.

6 Beginn des ersten Ladeschrittes in die Patronenlagerstellung 3. Beginn des zweiten Ladeschrittes in Stellung 4.

7 Auswurfstoß der Hülse aus der Patronenlagerstellung 2. Das Trommelgehäuse ist in Ruhe (gepufferte Lagerung).

1' Zündung der Patrone im Patronenlager (Stellung 5), das sich inzwischen vor die Verriegelungswand des Trommelgehäuses gestellt hat und im weiteren Verlauf wieder mit Patronenlagerstellung 1 bezeichnet werden müßte.

Ein Vertreter von Maschinenkanonen mit *Fremdantrieb* ist die „Vulcan"-Kanone, Bild 724 (III 1 in Bild 701). Sie beruht auf dem 1862 entwickelten „Gatling"-Prinzip, nach dem die Funktionen der Waffe nicht durch die Ausnutzung der Pulverenergie, sondern durch von außen zugeführte elektrische, hydraulische oder pneumatische Energie (Fremdenergie) bewirkt wird. Die Vulcan-Kanone hat elektrischen Antrieb und sechs Rohre, die der Waffe eine hohe Schußfolge verleihen.



Bild 724. *Vulcan-Kanone mit sechs 20-mm-Rohren.*

Die auf dem Umfang eines Kreises achsparallel angeordneten sechs Rohre und Verschlüsse sind hinten in einer Trommel zusammengefaßt, die um die Rohrbündelachse drehbar in einem lafettenfesten Gehäuse gelagert ist (Bild 725). Beim Schießen wird die Trommel mit dem Rohrbündel durch einen Elektromotor gedreht. Eine elliptische Kurvenbahn (Verschlußsteuerbahn) im festen Gehäuse bewirkt eine Hin- und Herbewegung der in ihr gesteuerten Verschlüsse, während Steuerorgane in der umlaufenden Trommel das Verriegeln der Verschlüsse und das elektrische Zünden der Patronen besorgen.

Beim Vorlaufen der Verschlüsse wird die synchron in Ladestellung gebrachte Patrone vom entsprechenden Verschluß erfaßt und während der Trommeldrehung kontinuierlich dem Rohr zugeführt. Beim Rücklaufen der Verschlüsse werden die leeren Hülsen ausgezogen und durch Abstreifer ausgeworfen.

Das Entladen der Waffe erfolgt mit Hilfe einer zweiten, im hinteren Teil des Gehäuses angeordneten kreisförmigen Steuerkurve (Leerlaufkurve), in die die Verschlüsse eingesteuert werden können. Die Waffe kann auch von Hand entladen werden.

Zwischen den rotierenden Teilen und dem feststehenden Waffengehäuse befinden sich Rückstoßdämpfer.

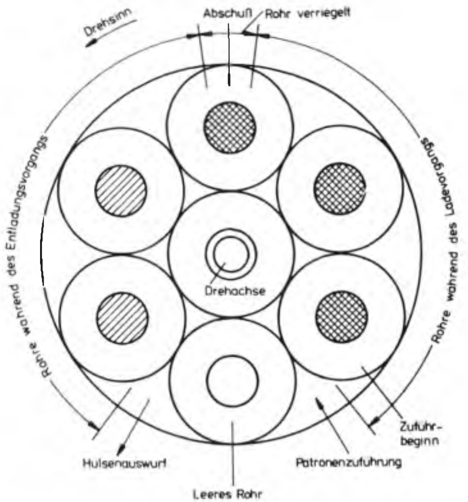


Bild 725. *Vulcan-Kanone, Rohrbündel (schematisch).*

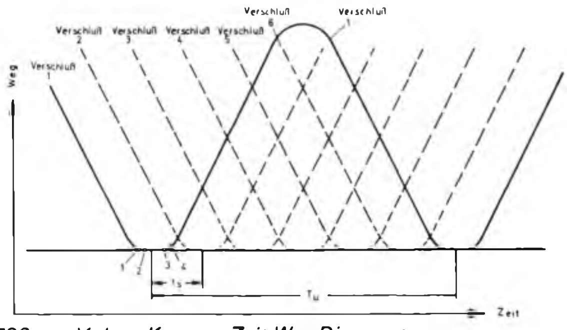


Bild 726. *Vulcan-Kanone, Zeit-Weg-Diagramm.*

Im Zeit-Weg-Diagramm der Vulcan-Kanone (Bild 726) bedeuten die Punkte

1 Verriegelung
2 Elektrische Zündung
3 Beginn der Entriegelung
4 Beginn des Ausziehens
t_s Schußzeit
T_U Trommelumlaufzeit

Der geringe Rücklauf des Waffengehäuses ist nicht dargestellt.

7.4. Wichtige Bau- und Funktionsgruppen automatischer Waffen

Das *Rohr* einer automatischen Waffe ist infolge der normalerweise hohen Feuerfolge außerordentlichen Temperaturbeanspruchungen ausgesetzt.

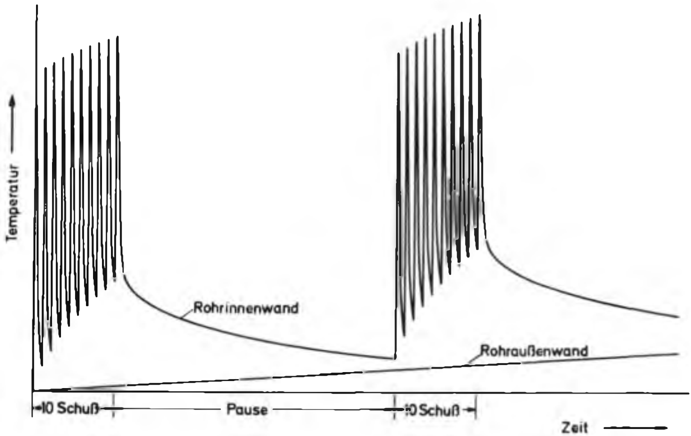


Bild 727. Temperaturverlauf an Innen- und Außenwand eines MG-Rohres bei zwei Feuerstößen mit Pause.

Bild 727 zeigt den ungefähren Temperaturverlauf an der Innen- und Außenwand eines MG-Rohres bei zwei Feuerstößen von je 10 Schuß mit dazwischenliegender Pause. Wenige große oder mehrere kleine Feuerstöße treiben die Temperatur an der Innenwand so hoch, daß sie einen erheblichen Einfluß auf die Materialfestigkeit und damit auf den Verschleiß ausüben. Dabei spielen die Kadenz, die Anzahl der Schüsse je Feuerstoß, die Pausen, die Länge der Pausen und die Anzahl der kurz hintereinander abgegebenen Feuerstöße im Zusammenhang mit der Warmfestigkeit des Rohrwerkstoffes und der Rohrwandstärke eine mitbestimmende Rolle.

Vergleichende Rohrlebensdauerbeschüsse sind daher mit gleichem Beschußrhythmus durchzuführen. Oft wird der französische Flarhythmus angewandt, das sind 144 Schuß in 12 Feuerstößen zu je 12 Schuß mit zwei Sekunden Pause nach jedem Feuerstoß und 20 Sekunden Pause nach je vier Feuerstößen und anschließender Abkühlung nach dem letzten Feuerstoß. Bei MG-Rohren wird oft ein Beschußrhythmus von 250 Schuß in mehreren Feuerstößen gewählt.

Rheinmetall hat zur Erprobung automatischer Waffen und ihrer Munition ein integriertes elektronisches Kadenz- und Rhythmussteuergerät entwickelt, das unter 7.7 näher beschrieben ist.

Maßnahmen zur Erhöhung der Rohrlebensdauer sind: Warmfester Werkstoff, Verchromen oder Nitrieren der Innenwand, progressiver Drall und Zugprofiländerung in Verbindung mit Rohrkaliberverengung. Weniger wirksam sind Kühlrippen oder auch Wasserkühlung.

Rohre für Maschinengewehre und Maschinenkanonen müssen schnell auswechselbar sein.

Das *Waffengehäuse* ist Befestigungs- und Führungsmittel für die verschiedenen Waffenteile. Es muß die beim Schuß auftretenden Kräfte aufnehmen und an den Waffenträger weiterleiten. Einfache Fertigung und leichte Zugänglichkeit zu den Funktionsteilen müssen gewährleistet sein.

Der *Verschluß* ist neben dem Gurtzuführer das wichtigste Funktionsorgan einer automatischen Waffe. Meist ist er mehrteilig und besteht aus dem Verschlußkopf mit Auszieher, einem Verschlußgehäuse, den Verriegelungselementen, soweit sie nicht fest am Verschlußkopf eingearbeitet sind, einem Steuerstück, dem Schlagbolzen und ggf. Prellverhütungsvorrichtungen.

Während das Geschoß durch die Pulvergase im Rohr beschleunigt wird, werden der Verschlußkopf und die Verriegelungselemente durch die Gaskraft belastet.

Die Verriegelungsteile müssen einfach gestaltet sein. Sie müssen sich ferner in Bruchteilen von Millisekunden sicher und ohne schädlichen Rücksprung verriegeln und ebenso sicher unabhängig vom Schmierzustand entriegeln lassen. Meist kennzeichnet man Verschlußarten nach ihrem Verriegelungsmechanismus wie Rollenverschluß, Stützriegelverschluß, Kippverschluß, Drehkopfverschluß u.a.

Das Gewicht der Verschlüsse soll klein sein, damit nur geringe Stoßenergien auftreten. Es werden kleine Längen angestrebt, weil sie in die Waffenlänge eingehen. Beispiele von Verschlüssen sind in Bild 709 und 715 gezeigt.

Die *Abzugvorrichtung* dient dazu, das Schießen zu beginnen, aufrechtzuerhalten und zu unterbrechen.

Bei *zu*schießenden Waffen hält die Abzugklinke den Verschluß in der Nähe des hinteren Umkehrpunktes fest und gibt ihn beim Betätigen frei.

Bei *auf*schießenden Waffen muß die Abzugklinke ein anderes Schlagmittel, den Hahn oder den gespannten Schlagbolzen, festhalten und freigeben können.

Die wichtigsten Forderungen an Abzüge sind Sicherheitsvorschriften: Jeder Abzug muß gesichert werden können, und jeder entsicherte Abzug darf den gespannten Verschluß durch Erschütterungen und Stöße nicht freigeben.

Mit Abzugvorrichtungen neuerer Entwicklungen können durch einfache Einstellung entweder nur Einzelschüsse, bemessene Feuerstöße oder Dauerfeuer abgegeben werden.

Die Betätigung der Abzüge kann von Hand, elektromagnetisch, pneumatisch oder hydraulisch erfolgen. Die Abzugskraft, d.h. die Kraft, die notwendig ist, um den Abzug zu betätigen, soll möglichst klein sein.

Als *Munitionszuführeinrichtungen,* die die Munition in die Ladestellung bringen sollen, werden Magazine oder Gurtzuführer benützt.

Bei *Magazinen* wird die Patrone durch Federkraft befördert. Die Feder wird vor dem oder beim Laden des Magazins gespannt, in Einzelfällen bei jedem Schuß automatisch.

In *Stangenmagazinen* wird die Munition meist doppelreihig hintereinander angeordnet. Bild 728 zeigt ein Stangenmagazin im Schnitt.



Bild 728. *Stangenmagazin.*

Bei *Trommelmagazinen* (Bild 729) sind die Patronen spiralförmig in einem trommelförmigen Gehäuse angeordnet. Trommelmagazine haben gegenüber Stangenmagazinen ein größeres Fassungsvermögen und eine weniger sperrige Bauweise.

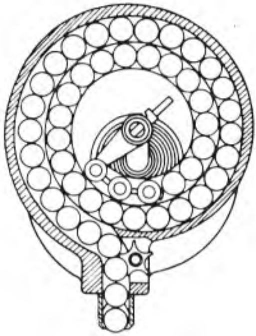


Bild 729. *Trommelmagazin.*

Bei *Gurtzuführern* sind die Patronen in Gurtgliedern gehalten, die zu langen Bändern aneinandergereiht sind; sie sind nach Verschuß der Patronen leicht zerlegbar, können aber auch fest verbunden bleiben. Die Gurtförderung erfolgt senkrecht zur Waffenachse durch Schaltglieder wie Klinken oder Sternräder, die bei jedem Schuß den Gurt um eine Teilung (Patronenabstand im Gurt) fördern, so daß jeweils eine Patrone in die Ladestellung kommt. Die Querbewegung oder Drehung der Schaltglieder wird in der Regel durch Schaltkurven bewirkt, die an einem querbeweglichen Hebel oder an einer drehbeweglichen Schaltwalze angebracht sind. Der Antrieb für die Schaltbewegung kann durch ein hin- und hergehendes Waffenteil wie den Verschluß, das Rohr oder das Waffengehäuse in einem oder zwei Schaltschritten erfolgen. Wird auf Vor- *und* Rücklauf der beweglichen Massen geschaltet, spricht man von Zweischrittschaltung.

Bei derartigen Gurtschaltungen ist auf die optimale Gestaltung der Steuerkurve zu achten: Es dürfen weder die Beanspruchungen der starren Steuerglieder, die proportional der Beschleunigung des Gurtes sind, noch die der Gurtglieder, die proportional der Schaltgeschwindigkeit sind, über das zulässige Maß ansteigen.

Außer durch einen rücklaufenden Teil der Waffe kann die Gurtzuführung auch über abgezweigte Gase durch Stoß, ähnlich wie beim Verschlußantrieb von Gasdruckladern (vgl. 7.2), oder durch von außen zugeführte Energie angetrieben werden (Vulcan-Kanone, Bild 724). Neuere Gurtzuführer gestatten durch Verwendung von zwei Gurten einen einfachen Munitionswechsel beim Einsatz. Der Wechsel von einem zum anderen Gurt geschieht durch einfache Hebelumschaltung.

Bei guten Waffenkonstruktionen ist die Munitionszuführung von mehreren Seiten möglich, um sie auch an schwierige Einbauverhältnisse bei Lafetten anpassen zu können.

Ladeeinrichtungen sind notwendig, um die Patrone aus der Ladestellung, in die sie durch die Zuführeinrichtung gebracht ist, in das Patronenlager einzuführen.

Bei den Waffen mit in Rohrachse beweglichen Verschlüssen ist es in der Regel eine Nase am Verschluß, die zusammen mit Führungselementen beim Verschlußvorlauf die außerhalb der Rohrachse liegende Patrone in das Rohr einführt.

Bei querbeweglichen oder feststehenden Verschlüssen (Trommelkanonen) sind besondere Vorrichtungen notwendig.

Der Ladeweg soll kurz sein, um bei geringen Verschlußgeschwindigkeiten hohe Kadenzen zu erhalten und kurze Waffenbaulängen zu erreichen.

Der *Auszieher,* ein meist am Verschlußkopf angebrachtes krallenförmiges Bauelement, greift beim Laden in die Patronenrille ein und zieht die Patronenhülse beim Verschlußrücklauf aus dem Patronenlager heraus.

Auswerfer bzw. *Ausstoßer* sind im Waffengehäuse feste oder drehbare, häufig gefedert gelagerte Elemente, an welche die zurücklaufende Hülse stößt, wodurch sie gekippt und durch eine Öffnung im Waffengehäuse ausgeworfen wird. Auswerfer bzw. Ausstoßer können auch im Verschluß gelagert sein; sie stützen sich dann beim Auswerfen ebenfalls am Gehäuse ab. Bei anderen Ausführungen kann die leere Hülse auch durch die nachfolgende Patrone ausgeworfen werden.

Trommelwaffen haben eine vom Schieber gesteuerte gehäusefeste Auswerfeinrichtung.

Auszieher und Auswerfer sind hochbeanspruchte Teile.

Die *Zündung* der Patrone erfolgt nach der Verriegelung durch einen im Verschluß gelagerten Schlagbolzen oder durch einen Zündstift.

Eine Feder, ein Teil der Verschlußmasse oder ein federangetriebener Hahn erteilen dem *Schlagbolzen* die notwendige Energie, um das Zündhütchen zur Zündung zu bringen.

Bei elektrischer Zündung stellt der *Zündstift* den Kontakt über das Zündhütchen her und schließt damit einen Stromkreis. Isolierter Einbau des Zündstiftes ist daher notwendig. Der Zündstrom wird entweder von außen zugeleitet oder aber beim Verschlußvorlauf erzeugt.

Bei jeder automatischen Waffe muß die Möglichkeit gegeben sein, die beim Schuß ablaufenden Funktionen auch ohne Schuß durchführen zu können. Dazu dient die *Durchladeeinrichtung,* die es ermöglicht, die Waffe schußbereit zu machen oder einfache Störungen wie Zündversager oder Hülsenfänger beseitigen zu können. Im einfachsten Fall ist die Durchladeeinrichtung eine Handspannvorrichtung für den Verschluß (mit oder ohne Hebelübersetzung). Oft werden hydraulische, pneumatische, elektrische oder pyrotechnische Mittel zur Verschlußspannung angewendet; insbesondere sind solche Mittel bei Fernbedienung notwendig.

Waffenfedern werden oft durch hohe Geschwindigkeiten schlagartig beansprucht. Ihre Beanspruchung ist nicht durch eine statische Betrachtungsweise zu erfassen, vielmehr sind die Erkenntnisse der Wanderwellentheorie zugrunde zu legen [1]. Nur damit sind die vergleichsweise geringen Lebensdauern gewisser Federn, z.B. der Schließfedern zu erklären. Es ergibt sich, daß eine Runddrahtschraubenfeder je 1 m/s Schlaggeschwindigkeit eine Beanspruchungserhöhung von etwa 3,5 N/mm^2 erleidet, die sich u. U. – wenigstens in einem Teil der Feder – noch verdoppelt. Mit den üblichen Werkstoffen ist es daher nicht möglich, solche Federn für Schlaggeschwindigkeiten über 12 m/s mit zufriedenstellender Haltbarkeit herzustellen. Durch die Verwendung von Seillitzenfedern konnte die Grenze der Beanspruchbarkeit bei tragbarer Lebensdauer auf etwa 14 m/s erhöht werden.

7.5. Leistungsbetrachtungen

Für eine Beurteilung der physikalischen Leistung, die mit Maschinenwaffen erzielt wird, bietet sich der Vergleich mit Wärmekraftmaschinen an. Wie bei einem Kolbenmotor wird bei der automatischen Schußwaffe in einem periodischen Ablauf chemische Energie freigesetzt. Beim Motor tritt der mechanische Anteil dieser Energie im wesentlichen über die Kurbelwelle als Antriebsenergie auf; ein geringer Teil dieser mechanischen Energie wird für die Steuer- und Ladefunktion (Ansaugen) gebraucht. Die mechanische Energie, die beim Betrieb einer automatischen Waffe erzeugt wird, fällt als kinetische Energie des Geschosses (und der strömenden Pulvergase) an; auch hier wird ein geringer Anteil für die Steuer- und Ladefunktion (Transport und Zuführung der Patrone) verwendet.

Um die thermische und mechanische Beanspruchung von automatischen Schußwaffen deutlich zu machen, läßt sich das Kriterium des Leistungsgewichts heranziehen. In der Tabelle 701 sind die Leistungsgewichte, die sich aus der kinetischen Energie des Geschosses, der Kadenz und dem Gewicht der Waffe berechnen, für verschiedene automatische Kanonen des Kalibers 20 und 30 mm zusammengestellt. Außerdem ist das jeweilige Entwicklungsjahr angegeben. Am Ende der

Tabelle sind die Leistungsgewichte für Pkw-Motoren sowie tur Rennwagen- und Flugmotoren genannt.

Man erkennt, daß — bezogen auf die gleiche Leistung — automatische Schußwaffen nach heutigem Stand etwa 1 % des Gewichtes von Pkw-Motoren und etwa 10 % des Gewichtes von hochgezüchteten Rennwagen- und Flugmotoren haben. Außerdem machen die Zahlen deutlich, wie das Leistungsgewicht der Maschinenkanonen mit der Zeit abgenommen hat.

Tabelle 701. *Leistungsgewichte von automatischen Kanonen und Verbrennungsmotoren.*

„Wärmekraftmaschine"	Kal. (mm)	Entwickl.-Jahr	Leistungsgewicht kg/kW
2 cm Flak 30	20	1930	0,29
2 cm Flak 38	20	1938	0,15
MK 202	20	1967	0,07
Vulcan-Kanone	20	1956	0,03
MK 108	30	1941	0,14
HS 831	30	1950	0,05
Trommelkanone D.E.F.A.	30	1954	0,04
Pkw-Motoren (über 1,3 l)			6,1 — 3,5 (4,5 — 2,6 kg/PS)
Rennwagenmotoren und Flugmotoren			1,1 — 0,4 (0,8 — 0,3 kg/PS)

Der angegebene Vergleich berücksichtigt noch nicht, daß die Energieumsetzung bei automatischen Schußwaffen wesentlich kurzzeitiger und insbesondere bei wesentlich höherem Druckniveau erfolgt als bei Verbrennungskraftmaschinen; außerdem wird die Energie für die Steuer- und Transportfunktionen schlagartig übertragen. Das bedeutet, daß die thermische und mechanische Beanspruchung bei automatischen Schußwaffen noch erheblich höher liegt als sich aus dem Vergleich nach der Tabelle ableiten läßt. Wenn man sich außerdem vergegenwärtigt, daß für die zu fordernde Funktionssicherheit die Steuer- und Transportfunktionen mit größter Exaktheit ablaufen müssen, mag man erkennen, was die „Kunst" des Waffenbauers, namentlich bei der Entwicklung automatischer Schußwaffen, ausmacht.

Neuere Entwicklungen automatischer Waffen zielen auf die Verwendung hülsenloser Munition[1]. Dabei ergeben sich für die Waffe zusätzliche konstruktive Probleme, u.a. auf den Gebieten der Liderung (ver-

[1]) Vgl. 11.4.2, S. 501

schlußseitige Dichtung) und der (schonenden) Munitionszuführung. Auch der Gefahr von Selbstentzündungen der Treib- und/oder Sprengladung infolge der erhöhten Temperatur im Bereich des Ladungsraums (cook-off) ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

7.6. Lagerung automatischer Waffen; Rücklauf- und Vorholeinrichtungen

Leichte automatische Waffen, nämlich Maschinenpistolen und Gewehre, bedürfen zum Schießen keiner besonderen Lagerungen; man kann sagen, daß die Lafettenfunktion direkt vom Schützen übernommen wird. Maschinenkanonen, auch schon Maschinengewehre beim gezielten Schießen, brauchen Waffenträger, d.h. Lafetten oder andere Mittel.

Es gibt drei Lagerungsmöglichkeiten von Waffen auf Waffenträgern: die starre, die gepufferte und die schwimmende Lagerung.

Bei der starren Lagerung sind Waffe und Waffenträger formschlüssig miteinander verbunden.

Bei der gepufferten Lagerung sind Waffe und Waffenträger durch eine Rücklauf- und Vorholeinrichtung elastisch miteinander verbunden; diese bringt die bei einem Schuß rücklaufende Waffe bis zum Brechen des Folgeschusses wieder sicher in die Ausgangsstellung zurück.

Die schwimmende Lagerung hat ebenfalls eine Rücklauf- und Vorholeinrichtung zwischen Waffe und Waffenträger, die jedoch so bemessen ist, daß der Folgeschuß *vor* Erreichen der Waffenausgangslage bricht.

Gepufferte und schwimmende Lagerungen werden angewandt, um die auf den Waffenträger wirkenden Kräfte im Interesse sowohl der Haltbarkeit des Trägers als auch des Treffbildes (Vermeidung von Erschütterungen) möglichst klein zu halten.

Bei *starrer* Lagerung ist die Kraftwirkung F_{max} auf den Waffenträger:

a) bei starrverriegelnden Waffen mit feststehendem Rohr

$$F_{max} = \frac{\pi}{4} D^2 p_{max};$$

(D = Kaliber, p_{max} = maximaler Gasdruck)

b) bei masseverriegelnden Waffen

$$F_{max} = P_{F max};$$

($P_{F max}$ = größte auf die Schließ- oder Pufferfeder wirkende Kraft des zurücklaufenden Verschlusses)

c) bei den anderen genannten Einlagerungsarten ist

$$F_{max} > P_{Fmax} < \frac{\pi}{4} D^2 p_{max}.$$

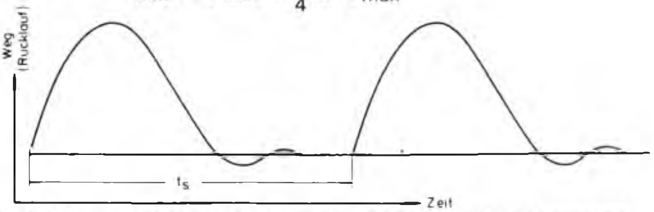


Bild 730. *Waffenrücklauf über der Zeit bei gepufferter Lagerung.*

Bei der *gepufferten* Lagerung besteht die Rücklauf- und Vorholeinrichtung normalerweise aus einem Feder- und einem Dämpfungsglied. Die halbe Schwingungszeit der Waffenmasse in diesem Federsystem muß kleiner als die Schußzeit t_s sein. Die Waffenrücklaufkurve über der Zeit hat einen Verlauf nach Bild 730; der Waffenrücklauf kann in weiten Grenzen variiert werden, je kürzer die Pufferzeit ist, desto größer wird die auf den Waffenträger wirkende Kraft F_{max}.

Bei der gepufferten Lagerung ist die kleinste zu erreichende Rücklaufkraft F_{max} etwa das Dreifache der mittleren Gesamtkraft $\bar{F}$, wobei $\bar{F}$ die theoretisch konstante Kraft ist, die auf den Waffenträger wirken würde, wenn sie während der Schußzeit konstant gehalten werden könnte.

Es ist

$$\bar{F} = \frac{J}{t_s} = \frac{J\,n}{60},$$

worin J den Impuls von Geschoß und Pulverladung und n die Kadenz (min^{-1}) bedeuten.

Bei der *schwimmenden* Lagerung besteht die Rücklauf- und Vorholeinrichtung ebenfalls aus einem Feder- und Dämpfungsglied; sie muß als Schwingungsgebilde zusammen mit der Waffenmasse eine halbe Schwingungszeit haben, die etwas größer als die Schußzeit ist.

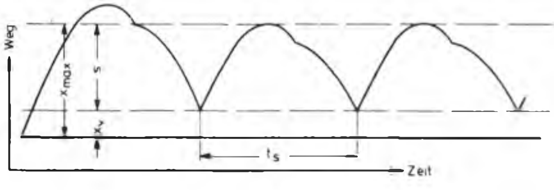


Bild 731. *Waffenrücklauf über der Zeit bei schwimmender Lagerung.*

In der Zeit-Weg-Kurve bei schwimmender Lagerung (Bild 731) bedeuten

x_{max}	den hinteren Umkehrpunkt (max. Rücklauf),
x_v	den vorderen Umkehrpunkt,
s	den Schwimmweg und
t_s	die Schußzeit.

Dadurch, daß die Folgeschüsse bei noch vorlaufendem Waffengehäuse zünden, werden die Rücklaufgeschwindigkeiten um den Wert der Vorlaufgeschwindigkeiten vermindert und beim Feuerstoß niedrigere maximale Rücklaufkräfte bewirkt. Die kleinste Rücklaufkraft kann auf 2 bis 3 $\bar{F}$ herabgesetzt werden.

Die Abstimmung einer Rücklauf- und Vorholeinrichtung für schwimmende Lagerung ist nicht leicht, insbesondere wenn noch Vorschriften über die Lage des Pufferstoßes bezüglich der Bewegung des Waffengehäuses gefordert werden und während des Feuerstoßes keine vorwärts gerichteten Kräfte auf die Waffenunterlage zugelassen sind.

Mit einer schwimmenden Lagerung kann eine Kadenzschwankung von etwa 200 Schuß je Minute beherrscht werden. Je kleiner der zu beherrschende Kadenzbereich ist, um so weiter kann die Rückstoßkraft herabgesetzt werden.

7.7. Elektronisches Kadenz- und Rhythmussteuergerät IKARUS

Die Erprobung automatischer Waffen und ihrer Munition schließt auch die Erprobung hinsichtlich Kadenz und Feuerrhythmus ein; diese wird namentlich bei vergleichenden Beschüssen mehrerer gleicher oder ähnlicher Waffen gefordert. Mechanische Schußzähler und Schußsteuerungen sind wegen ihrer begrenzten Folgsamkeit und der Schwierigkeit der Fernübertragung nicht geeignet; erst die modernen Hilfsmittel der Elektronik mit berührungsfreiem Abgriff der Impulse ermöglichen es, Kadenzen und Rhythmen einwandfrei zu messen sowie vorgegebene Steuerungen von Kadenz und Feuerrhythmus zu verwirklichen.

Rheinmetall hat zu diesem Zweck das integrierte elektronische Kadenz- und Rhythmussteuergerät IKARUS entwickelt und zur Anwendung gebracht.

Im Hinblick auf eine möglichst flexible Verwendung wurde kein festprogrammiertes Steuergerät entworfen, vielmehr wurde eine Steuereinrichtung geschaffen, welche die Einstellung eines der international standardisierten Rhythmen bzw. eines speziell gewünschten Rhythmus gestattet.

Es sind drei Beschußarten vorgesehen und einstellbar: Einzelfeuer, Dauerfeuer und kadenzgesteuertes Einzelfeuer (schnelles Einzelfeuer).

Dauerfeuer und kadenzgesteuertes Einzelfeuer können in einem einstellbaren Rhythmus geschossen werden.

Die bei den einzelnen Betriebsarten auftretenden Steuerbefehle werden in einer rein elektronischen Steuerstufe verarbeitet. Der Abfeuermagnet wird über elektronische Leistungsschalter (Transistoren/Thyristoren) betätigt.

Die bei der Vorwahl eingestellten Bestimmungsgrößen werden in einer binärdigitalen Steuerstufe verarbeitet und über eine Leistungsstufe dem Abfeuermagneten als Schaltbefehle zugeleitet. Das Erfassen der Gesamtschußzahl erfolgt über einen geeigneten Schußzähler, dessen Anzeigevorrichtung sich auf der Bedientafel befindet.

Technische Daten:
Versorgungsspannung 24 V Gleichstrom ± 20 % oder wahlweise 220 V/50 Hz/1 ∿.

Die Toleranz für Kadenz- und Zeitwerte beträgt ±1 %.
Die Schaltleistung der elektronischen Leistungsschalter beträgt bis 24 V Gleichstrom 3 kW.

Literatur

[1] Maier, K.W.: Die stoßbelastete Schraubenfeder. Konstruktion-Elemente-Methoden 3 (1966) H. 2, 3, 4, 9; 4 (1967) H. 1, 2, 3, 4, 12.

8. Geschütze

„Geschütz" ist der Oberbegriff für die Schußwaffen (Rohrwaffen), die wegen ihrer Ausmaße und Gewichte nicht mehr von einem Mann gehandhabt werden können, wie das bei den Faust- und Handfeuerwaffen möglich ist.

In diesem Abschnitt werden diese Schußwaffen aus der Sicht des Geschütz- und Kanonenbauers in einer funktionsbezogenen Systematik behandelt, wobei die Funktion vom Schuß aus dem Rohr ausgeht und bis zur Einleitung der beim Schuß auftretenden und durch das Gesamt-Waffensystem verlaufenden Kräfte in das tragende Medium reicht.

Zunächst wird eine Übersicht über die verschiedenen Geschützarten, deren Verwendung, Hauptmerkmale und Hauptgeschützteile gegeben.

Die Geschütze sind zu unterscheiden

nach der *Verwendung* als:

Schweres MG, Mörser, Luftlandegeschütz, Panzerabwehrkanone,
Schützenpanzer-, Jagdpanzerbordkanone,
Kampfpanzer-, Spähpanzerbordkanone,
Feldgeschütz, Gebirgsgeschütz, Flugabwehrkanone,
Panzergeschütz, Eisenbahngeschütz,
Schiffsgeschütz, Küstengeschütz;

nach den *Hauptmerkmalen:*

Reichweite,
Kampfentfernung,
Flugbahnkrümmung,
Schußfolge,
Richtbereich,
Beweglichkeit,
Schutz.

Entsprechend den verschiedenen Geschützarten sind die Hauptgeschützteile sehr unterschiedlich gestaltet. Diese sind:

Geschützrohr, wozu auch	Verschluß, Abfeuerung, Mündungsbremse und Rauchabsauger gehören;
Lafette, wozu auch	Rohrwiege, Rohrbremse, Rohrvorholer, Richtmaschinen und Ausgleicher gehören;
Ladeeinrichtung.	

In der Übersichtstabelle 801, Geschützarten und unterscheidende Merkmale, werden zunächst einige Angaben für die Merkmale der allgemeinen Geschützarten Mörser, Haubitzen und Kanonen gemacht.

Bestimmte Angaben werden angeführt für die Merkmale typischer Beispiele der Geschützarten, die auch in den Bildern 801 bis 831 gezeigt werden.

In weiteren Abschnitten werden die Funktionen und der Aufbau der Hauptgeschützteile und Baugruppen dargestellt.

8.1. Geschützrohre

Die Geschützrohre, in den Materialgrundlagen der Bundeswehr mit *„Rohr, vollständig"* bezeichnet, haben die Aufgabe, Geschosse mit einer bestimmten Geschwindigkeit und Richtung in den Raum zu schießen.

Die Geschosse werden durch einen hohen Gasdruck beschleunigt, welcher im Ladungsraum des Geschützrohres durch Verbrennen von Treibladungen entsteht.

Die unterscheidenden Merkmale der Geschützrohre bei den verschiedenen Geschützarten sind in der Tabelle 801 angegeben.

Die Geschützrohre bestehen aus Rohr, Verschluß, Abfeuerung und gegebenenfalls Mündungsbremse und Rauchabsauger.

Das Geschützrohr bildet zusammen mit den beim Schuß rücklaufenden Teilen der Rohrbremse, des Rohrvorholers und etwaiger sonstiger Teile wie z.B. einer Ladeeinrichtung die sogenannte *rücklaufende Masse*.

Entsprechend der in Abschnitt 8.2.2.1 dargestellten Systematik für die dort auch definierten Geschützteile, die sich um die Höhenricht-, Seitenricht- und Verkantungsachse drehen, wird für die rücklaufende Masse in diesem Abschnitt die Bezeichnung *Geschützrücklaufteil* oder auch Kanonenrücklaufteil, abgekürzt: *Rücklaufteil* oder GRT verwendet.

Tabelle 801. *Geschützarten und unterscheidende Merkmale.*

Geschützarten / Unterscheidende Merkmale		Geschützrohr			
		Seelenrohrlänge (Kal.)	v_0 (m/s) Fluggew. (kg)	max. Schußweite (m)*	Kampfentfernung(m)**
1	2	3	4	5	6
Allgemeine Geschützarten	Bild				
Mörser	–	7-18	100-300	900-10500	
Haubitzen	–	12-39	300-830	5000-30000	
Kanonen	–	30-152	700-1600	7000-115000	
Typische Beispiele der Geschützarten					
Schweres Maschinengewehr sMG 3	801	70	820 0,00945	4 000	1 200 bis 1 800
Mörser MRS 120 mm	802	12,5	rd. 300 12,22	6 150	–
Bordmörser BMRS 120 mm	803	12,5	rd. 300 12,22	6 150	–
Panzerabwehr-Leichtgeschütz (rückstoßfrei) Pz Abw LGS 106 mm	804	32	504 7,9	7 700	bis 900
Turm für Schützenpanzer „Marder" mit MK 20 mm Rh 202	805	92	1100 0,111	7 000	2 000
Panzerabwehrkanone mit Hilfsantrieb Pak 85 mm D48 HA	806	54	1030 5	15 600	1 000
Panzerabwehrkanone mit Hilfsantrieb Pak 90 mm HA	807	40,5	1181 5,74	7 000	1 500
Jagdpanzer-Bordkanone JPz BK 90 mm	808 809	40,5	1181 5,74	7 000	1 800
Turm für Spähpanzer 2 (Rad-, Schwimm) mit MK 20 mm Rh 202	811	92	1100 0,111	7 000	2 000
Kampfpanzer-Bordkanone KPz BK 120 mm M58 (US) auf KPz AMX 50	810		1 300		
Kampfpanzer-Bordkanone KPz BK 120 mm Rh m. Ladeeinr.	812	rd. 45	rd. 1500 rd. 4	60 000	3 000
Kampfpanzer-Bordkanone BK 105 mm des KPz Strv 103 „S"	813	62	rd. 1625 5,79		3 000
Kampfpanzer-Bordkanone KPz BK 120 mm Rh dreiachsig stabilis.	814	rd. 45	rd. 1500 rd. 4	60 000	3 000
Gebirgshaubitze GEBH 105 mm	815	14	420 14,8	11 100	800
Feldhaubitze FH 122 mm D – 30	816 817 818	33	730 21,3	15 300	1 200
Feldhaubitze mit Hilfsantrieb FH 155 mm HA	819 820	39	rd. 800 43,5	rd. 24 000	1 500
Feldkanone 24 cm K3	821	52	970 151,4	37 500	–
Selbstfahr-Kanone K 175 mm SF M107	822	60	914 67,0	32 800	–
Panzerhaubitze Pz H 155 – M109 G	823	23	685 43,5	18 000	1 200
Eisenbahnkanone 21 cm K 12 (E)	824	152	1 625 107,5	115 000	–
Flugabwehrkanone Flak 20 mm Zwilling	825 826	92	1 100 0,111	7 000	2 000
Flugabwehrkanone 8,8 cm Flak 41	827 828	72	1 000 9,4	19 800	2 000
Flugabwehrkanone 15 cm Flak 55	829	52	890 40	22 500	1 800
Flugabwehrkanone 12,8 cm Flak Zwilling 40	830	61	880 26	20 900	1 800
Schiffs-Flugabwehrkanone 3,7 cm S.K. C/30 Zwilling	831		1 000 0,745	8 500	

* Schußweite bei der Rohrerhöhung, die unabhängig vom Richtbereich des Geschützes die

Art der Flugbahn	Lafette Richtbereich (°) Höhe	 Seite	 Lafettenbauart Fahrbarmachung	Ladeeinrichtung Art Schuß/min	Zieleinrichtung (siehe auch Kap. 7)
7	8	9	10	11	12
Angaben für die allgemeinen Geschützarten					
sehr stark gekrümmt	>45	6-360			
stark gekrümmt	<u.>45	36-360			
gestreckt	<45 Flak bis 90	56-360			
Angaben für die typischen Beispiele der Geschützarten					
gestreckt	15	35	Dreibein-Lafette Spindelrichttriebe	vollautomatisch 1150	Winkelzielfernrohr
sehr stark gekrümmt	+45 bis +80	360	Bodenplatte und Zweibein Schießen mit und ohne Räder Spindelrichttriebe gezogen durch Kraftwagen	Vorderlader von Hand 15	Richtaufsatz
sehr stark gekrümmt	+48 bis +78	60	Kugel am Rohr/Kugelpfanne Zweibein auf Rollenwagen Spindelrichttriebe, Kettenfahrgestell	Vorderlader von Hand 15	Richtaufsatz
stark gekrümmt	−15 bis +15	60	Pivot-Schlitten-Lafette Zahnradrichtmaschinen Kettenfahrgestell	von Hand 4	Winkelzielfernrohr, Einschießgewehr 12,7 mm
gestreckt	−17 bis +65	360	Turm-Scheitel-Lafette Kettenfahrgestell	vollautomatisch 1 000	Periskop-Zieleinrichtung
gestreckt	−5 bis +35	54	Räder-Spreiz-Lafette Hilfsantrieb oder gezogen durch Kraftwagen	von Hand 10	Pz-Zielfernrohr
gestreckt	−8 bis +25	50	Räder-Rahmen-Lafette Trogwiege Hilfsantrieb oder gezogen durch Kraftwagen	von Hand 10	Pz-Zielfernrohr
gestreckt	−8 bis +15	30	Kasematt-Pivot-Lafette Jackenwiege, Spindelrichtmaschinen Kettenfahrgestell	von Hand 10	Pz-Zielfernrohr
gestreckt	−15 bis +70	360	Turm-Lafette Räderfahrgestell 8 × 8	vollautomatisch 1 000	Periskop-Zieleinrichtung
gestreckt	−6 bis +13	360	Turm-Jackenwiege Drehkranz-Oberlafette Kettenfahrgestell	vollautomatisch	
gestreckt	−9 bis +20	360	Turm-Lafette Jackenwiege, Kettenfahrgestell	teilautomatisch 10	Pz-Zielfernrohr Feuerleitanlage
gestreckt	−10 bis +12	360	Kanonenrohr nur rücklaufbeweglich in Kettenfahrz. gelagert Höhen- u. Seitenrichten durch Fz.	vollautomatisch	Rundblick-Zielfernrohr
gestreckt	−15 bis +15	360	Turmwiege mit Gleitschienen für Rohr u. Verschluß, Verkantungsträger, Drehkranz-Oberlafette, Kettenfahrgestell	vollautomatisch 10	Pz-Zielfernrohr Feuerleitanlage
stark gekrümmt	0 bis +50	56	Räder-Spreizlafette, schnell zerlegbar für Maultier od. gezogen durch Kraftw.	von Hand 15	Richtaufsatz Pz-Zielfernrohr
stark gekrümmt	−5 bis +65	360	Räder-Kreuz-Lafette, Trogwiege gezogen durch Kraftwagen	von Hand 6	Richtaufsatz Pz-Zielfernrohr
stark gekrümmt	−5 bis +70	56	Räder-Spreizlafette Hilfsantrieb oder gezogen durch Kraftwagen	teilautomatisch	Richtaufsatz Pz-Zielfernrohr
gestreckt	−1 bis +56	fein 6 grob 360	Jackenwiege, Rohr- u. Lafettenrücklauf verlastbar auf fünf Sonderanhänger	Ladehilfe 15/h	Richtaufsatz
gestreckt	0 bis +65	60	Trogwiege, Drehkranz-Oberlafette Kettenfahrgestell	Ladehilfe 0,5–1	Richtaufsatz
stark gekrümmt	−2 bis +70	360	Jackenwiege, Turmlafette Kettenfahrgestell	von Hand 6/h	Richtaufsatz
gestreckt	+25 bis +55	Gleiskurve o. Drehscheibe	Eisenbahnlafette auf 18 Rädern in 4 Drehgestellen, Rohr- und Lafettenrücklauf, Jackenwiege	Ladehilfe 6/h	Richtaufsatz
gestreckt	−5 bis +83	360	Kreuzlafette, Drehkranz-Oberlafette Einachsfahrgestell gezogen durch Kraftwagen	vollautomatisch 2×1000	Feuerleitanlage
gestreckt	−3 bis +90	360	Kreuzlafette, horizontierbare Drehkranz-Oberlafette, Trogwiege, Sonderanhänger gezogen durch Kraftw.	teilautomatisch 25	Zielfernrohr Folgezeiger
gestreckt	−3 bis +88	360	Kreuzlafette, horizontierbare Pivot-Oberlafette, Trogwiege, Sonderanhänger gezogen durch Kraftwagen	vollautomatisch 9	Zielfernrohr Folgezeiger
gestreckt	−3 bis +88	360	Zwillings-Drehkranz-Sockellafette ortsfest	automatisch 2×12	Folgezeiger
gestreckt	−10 bis +75	360	Jackenwiegen, Drehkranz-Sockellafette, dreiachsig stabilisiert, ortsfest	von Hand	

max. Schußweite ergibt.



Bild 801.

Schweres Maschinengewehr – sMG 3 (MG 3 und Lafette: Rheinmetall).

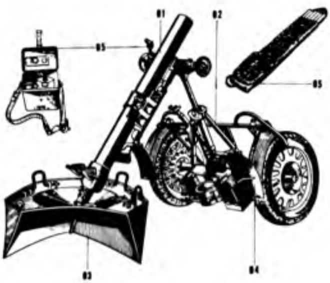


Bild 802.

Mörser – MRS 120 mm (Brandt); 01 Rohr, 02 Zweibein, 03 Bodenplatte, 04 Fahrgestell, 05 Richtmittel.

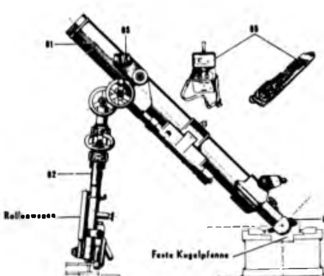


Bild 803.

Bordmörser – BMRS 120 mm (Brandt); 01 Rohr, 02 Zweibein, 03 bewegliche Kugelpfanne, 05 Richtmittel.

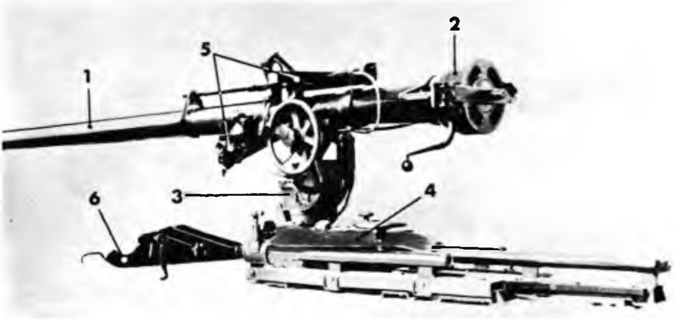


Bild 804. *Panzerabwehr-Leichtgeschütz (rückstoßfrei) — Pz Abw LGS 106 mm (Waffe: USA, Bordlafette: Rheinmetall);*
1 Rohr, 2 Verschluß, 3 Oberlafette mit Richtmaschinen, 4 Unterlafette mit Schlitten und Schlittenführung, 5 Zieleinrichtung, 6 Zurrung.

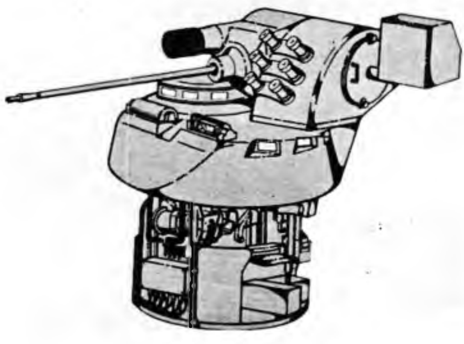


Bild 805. *Turm für Schützenpanzer „Marder" mit MK 20 mm Rh 202 (Turm: Keller & Knappich, Waffe: Rheinmetall).*



Bild 806. *Panzerabwehrkanone mit Hilfsantrieb – Pak 85 mm D48 HA (UdSSR).*



Bild 807. *Panzerabwehrkanone mit Hilfsantrieb – Pak 90 mm HA (Rheinmetall 1966).*



Bild 808. *Jagdpanzer-Bordkanone — JPz BK 90 mm, Ansicht von links (auf Montagegerüst) (Rheinmetall 1964).*



Bild 809. *Jagdpanzer-Bordkanone — JPz BK 90 mm, Ansicht von rechts (auf Montagegerüst) (Rheinmetall 1964).*



Bild 810. *Kampfpanzer-Bordkanone — KPz BK 120 mm M 58(US) auf KPz AMX 50.*



Bild 811. *Turm für Spähpanzer 2 (Rad-, Schwimm) mit MK 20 mm Rh 202 (Turm und Waffe: Rheinmetall).*



Bild 812. *Kampfpanzer-Bordkanone – KPz BK 120 mm Rh mit Ladeeinrichtung im Prüfstand (Rheinmetall).*

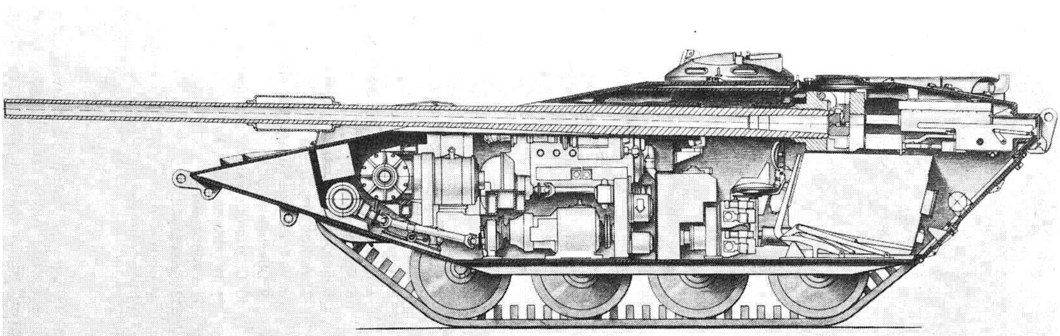


Bild 813. *Kampfpanzer-Bordkanone – BK 105 mm des KPz Strv 103 „S" (Bofors 1967).*

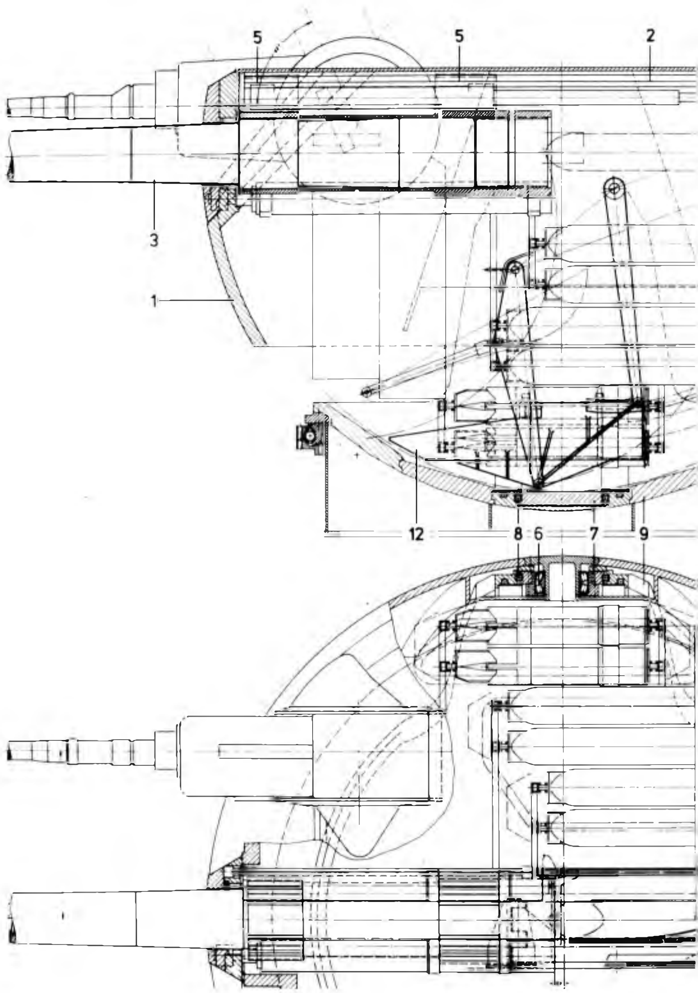
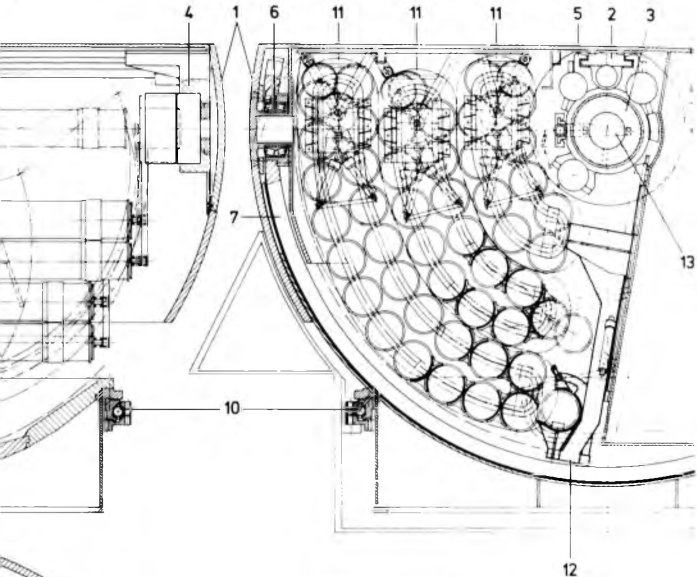
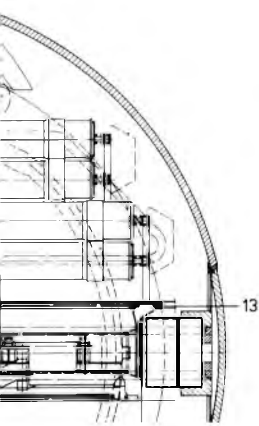


Bild 814. *Kampfpanzer-Bordkanone – KPz BK 120 mm Rh dreiachsig stabilisiert (Waffenanlage und vollautomatische Ladeeinrichtung: Rheinmetall; Turm: Rheinstahl).*





1 Kugelförmige Turmwiege
2 Gleitschiene
3 Kanonenrohr
4 Schraubverschluß mit Gleitklauen
5 Rohrgleitklauen
6 Schildzapfenlagerung
7 Verkantungsträger
8 Verkantungsträgerhalbkreislagerung
9 Oberlafette
10 Oberlafettendrehkranzlagerung
11 Munitionsbehälterketten
12 Ladeschale
13 Ansetzer



Bild 815. *Gebirgshaubitze – GEBH 105 mm (Oto Melara, La Spezia, Italien 1958).*



Bild 816. *Feldhaubitze – FH 122 mm D-30 von hinten rechts (UdSSR).*

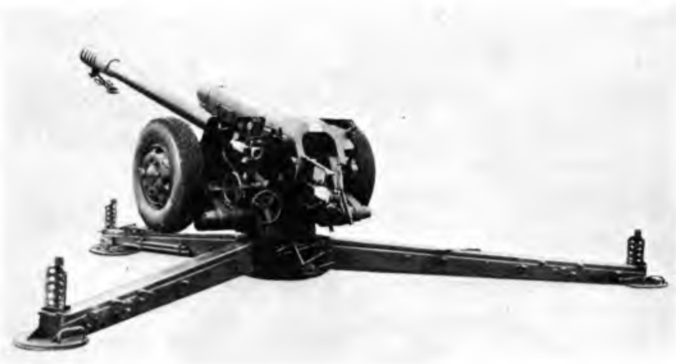


Bild 817. *Feldhaubitze – FH 122 mm D-30 von hinten links (UdSSR).*



Bild 818. *Feldhaubitze – FH 122 mm D-30 Fahrstellung (UdSSR).*



Bild 819. *Feldhaubitze mit Hilfsantrieb – FH 155 mm HA in Feuerstellung (Rheinmetall, Vickers, Faun).*



Bild 820. *Feldhaubitze mit Hilfsantrieb – FH 155 mm HA in Fahrstellung (Rheinmetall, Vickers, Faun).*

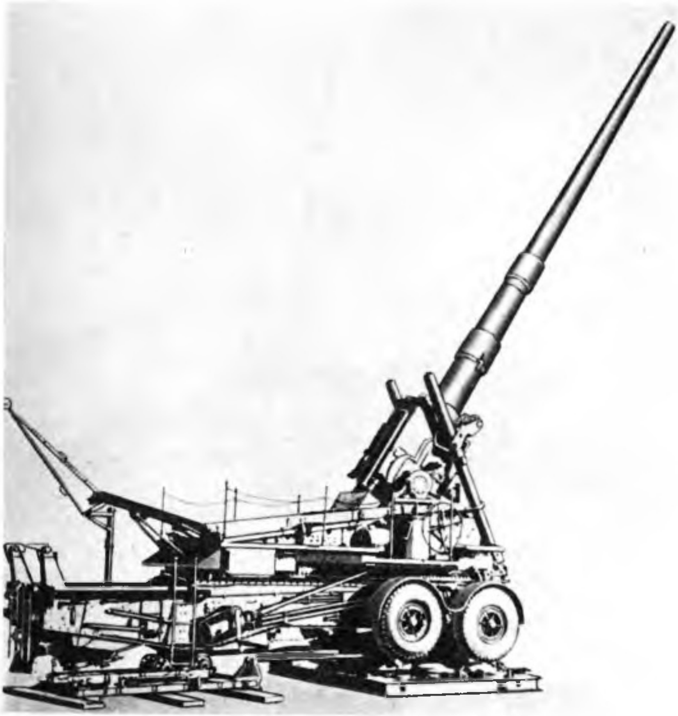


Bild 821. *Feldkanone – 24 cm K3 (Rheinmetall 1938).*



Bild 822. *Selbstfahr-Kanone – K 175 mm SF M107 (USA).*



Bild 823. *Panzerhaubitze – Pz H 155 – M109 G (USA; Umrüstungen für BRD: Rheinmetall).*

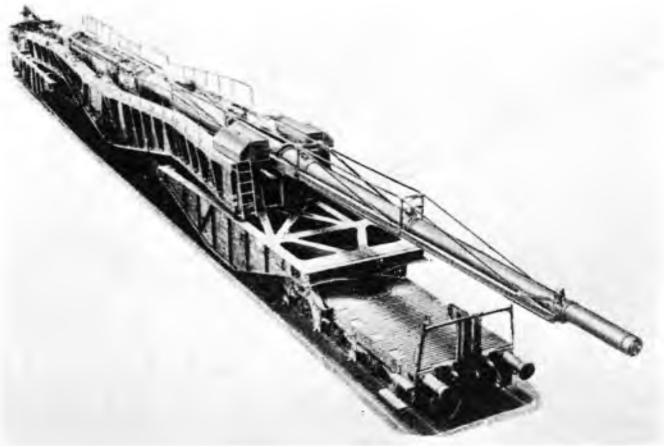


Bild 824. *Eisenbahnkanone – 21 cm K12 (E) (Krupp 1940).*



Bild 825. *Flugabwehrkanone – Flak 20 mm Zwilling mit MK 20 Rh 202 in Feuerstellung (Rheinmetall).*



Bild 826. *Flugabwehrkanone – Flak 20 mm Zwilling mit MK 20 RH 202 in Fahrstellung (Rheinmetall).*



Bild 827. *Flugabwehrkanone – 8,8 cm Flak 41 in Feuerstellung (Rheinmetall 1942).*

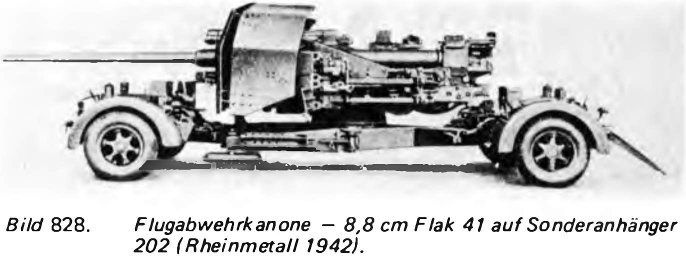


Bild 828. *Flugabwehrkanone – 8,8 cm Flak 41 auf Sonderanhänger 202 (Rheinmetall 1942).*



Bild 829. *Flugabwehrkanone – 15 cm Flak 55 (Rheinmetall 1938).*

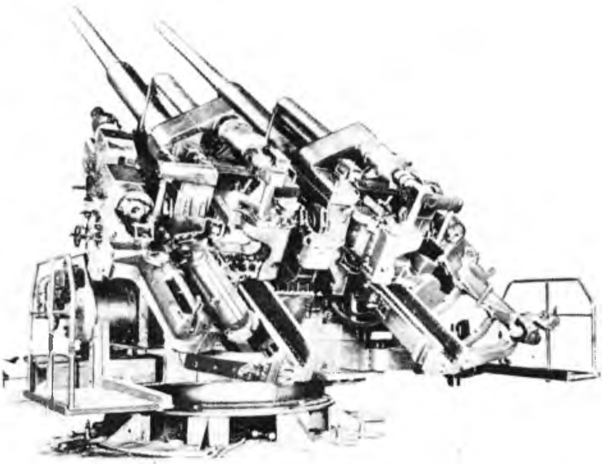


Bild 830. *Flugabwehrkanone – 12,8 cm Flak Zwilling 40 (Rheinmetall 1942).*

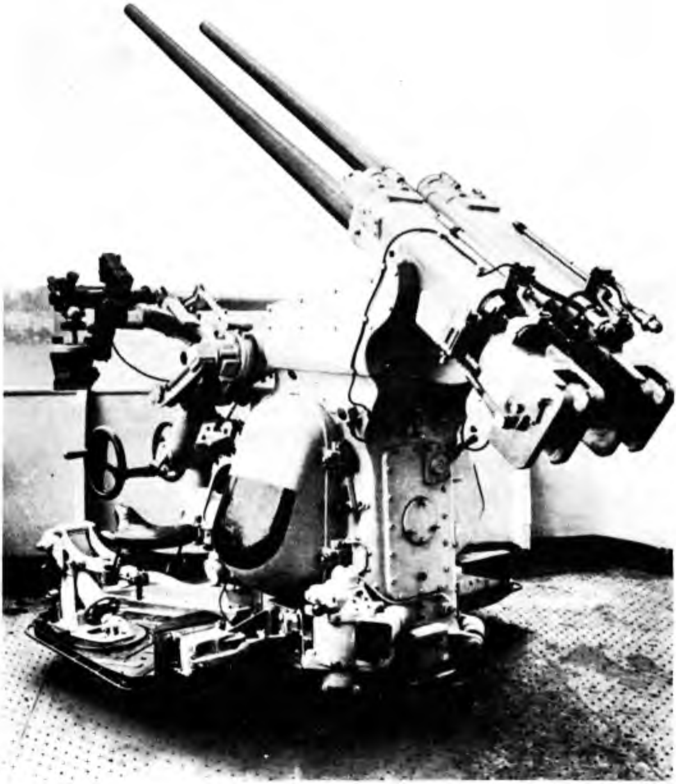


Bild 831. *Schiffs-Flugabwehrkanone 3,7 cm S.K. C/30 Zwilling (Rheinmetall 1930).*

Bild 832 zeigt das Geschützrohr einer Feldhaubitze für Beuteltreibladungen (s. auch Bild 819 und 820).

Bild 833 stellt das Kanonenrohr eines Kampfpanzers für Patronenmunition dar (s. auch Bild 812).

Auf Bild 804 ist das rückstoßfreie Leichtgeschützrohr abgebildet.

Die Hauptbaugruppen und die in den Legenden der Zeichnungen angeführten Bauteile werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

8.1.1. Rohre

Folgende Rohrarten können unterschieden werden:

Vollrohre, Mehrlagenrohre, Vollrohre mit Autofrettage, Rohre mit auswechselbaren Futterrohren und auswechselbare Rohre.

8.1.1.1. Vollrohre

Seit der Mitte des 14. Jahrhunderts bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts wurden im allgemeinen gegossene Vollrohre aus Bronze, Gußeisen oder Gußstahl verwendet.

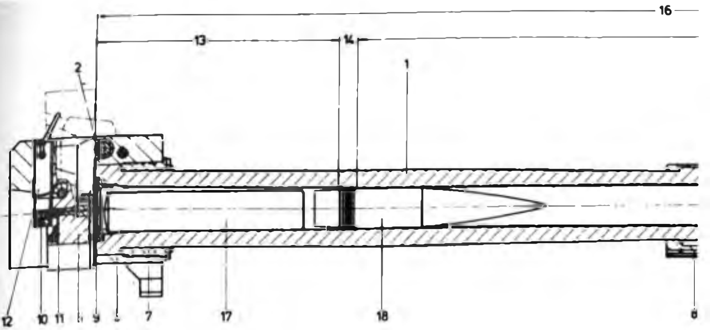
Auch heute werden bei kleineren Kalibern und geringeren Gasdrücken noch Vollrohre verwendet, die allerdings geschmiedet oder im Schleudergußverfahren hergestellt sind und deren zu erreichende Streckgrenze erheblich höher liegt als bei früheren Rohren ($\sigma_{0,2}$ bis zu 1275 N/mm²). Bei diesen hohen Streckgrenzen treten Sprödbruchprobleme auf, die beachtet werden müssen.

Die Bilder 832 und 833 zeigen verschiedene Vollrohre.

Die Wandstärken der Rohre sind entsprechend der Gasdruckbelastung, die sich aus dem Druck im Rohr bei dem jeweiligen Geschoßweg ergibt, ausgelegt (Bild 834).

Berechnung der Rohre siehe Abschnitt 8.1.6.

Die Verwendung der Rohre als Vollrohre (ohne Autofrettage) ist dadurch begrenzt, daß, insbesondere bei dickwandigen Vollrohren, die Dehnung infolge der Aufweitung durch den Gasdruck beim Schuß und damit auch die Beanspruchung in der Rohrinnenfläche wesentlich größer ist als in der Rohraußenfläche (Bild 835).



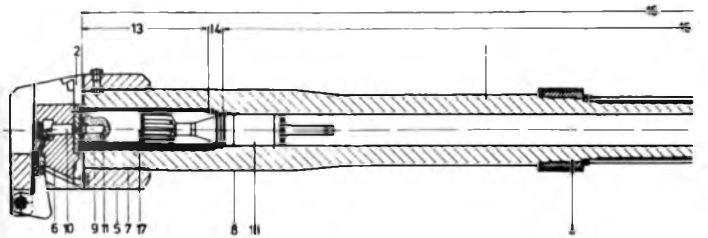
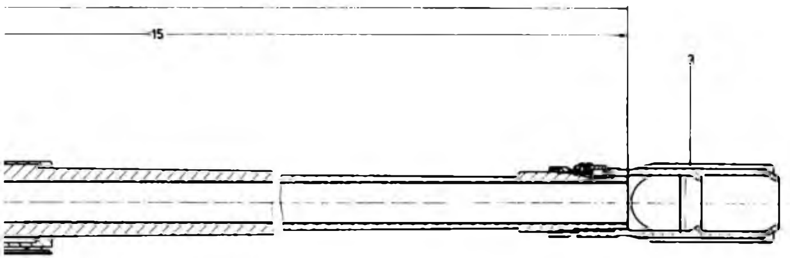
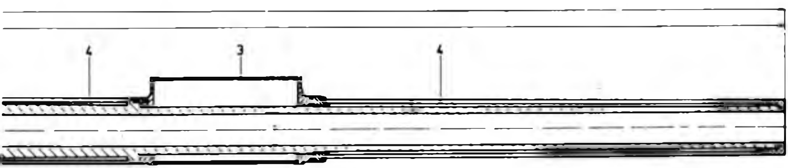


Bild 832. *Geschützrohr einer Feldhaubitze für Beuteltreibladungen.*

Bild 833. *Kanonenrohr eines Kampfpanzers für Patronenmunition.*



1 Rohr
2 Hubkeilverschluß
3 Mündungsbremse
5 Bodenstuck
6 Hubkeil
7 Spannschraube
8 Vordere Rohrklaue f. Tragwiege
9 Ringliderung
10 Schlagbolzen
11 Treibladungsanzunder
12 Treibladungsanzündermagazin
13 Ladungsraum
14 Übergangskegel
15 Geschoßwegteil, gezogen (mit Drallzüge)
16 Seelenrohr
17 Beuteltreibladung
18 Geschoß



1 Rohr
2 Fallkeilverschluß
3 Rauchabsauger
4 Wärmeschutzhulle
5 Bodenstuck
6 Fallkeil
7 Bajonettverschraubung
8 Zylindrischer Teil fur Jackenwiegenlagerung
9 Hulsenliderung
10 Zundbolzen
11 Treibladungsanzünder
13 Ladungsraum
14 Ubergangskegel
15 Geschoßwegteil, glatt (ohne Drallzuge)
16 Seelenrohr
17 Hulse und Treibladung
18 Geschoß

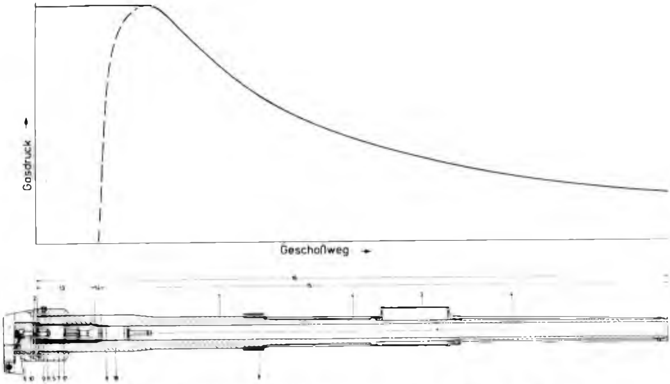


Bild 834. *Gasdruck im Rohr beim jeweiligen Geschoßweg.*

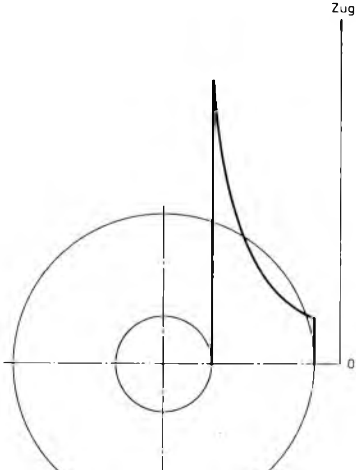


Bild 835. *Verlauf der Beanspruchung in der Rohrwand eines Vollrohres von innen nach außen.*

Der Unterschied zwischen den Spannungen an der inneren und äußeren Oberfläche des Rohres wächst mit zunehmender Wandstärke, so daß der innere Teil des Rohrquerschnittes die zulässige Beanspruchung erreicht hat, während der äußere Teil nur unerheblich belastet ist. Durch diese schlechte Ausnutzung des Rohrwerkstoffes entstehen große Abmessungen und Gewichte bei den Vollrohren, so daß deren Anwendung unzweckmäßig sein kann.

Um einen größeren Widerstand des Rohres gegen den Gasdruck zu erreichen, ist also anzustreben, die Beanspruchung beim Schuß gleichmäßiger über die Wandstärke zu verteilen.

Dies wird durch Verwendung von Mehrlagenrohren oder Vollrohren mit Autofrettage erreicht.

8.1.1.2. **Mehrlagenrohre**

Von etwa 1870 an wurden Mehrlagenrohre eingeführt.

Bei diesen ist die Rohrwand in mehrere Lagen aufgeteilt, und zwar derart, daß über das Seelenrohr Ringe, Rohrmäntel oder beides aufgeschrumpft werden. Bei einer anderen Ausführungsart werden viele Lagen Bandstahl glühend oder kalt mit Zugspannung auf ein Seelenrohr aufgewickelt.

In allen Fällen erzeugen im Endzustand die durch die Schrumpfungen oder Wicklungen in den Außenlagen entstandenen Zugspannungen Druckspannungen in den inneren Schichten des Rohres.

Die im unbelasteten Zustand im inneren Bereich der Rohrwand vorhandenen Druckspannungen kompensieren die Belastung beim Schuß zu einem großen Teil, während die Zugspannungen im äußeren Bereich der Rohrwand durch die Belastung um einen kleinen Betrag erhöht werden. Auf diese Weise wird die Beanspruchung über den ganzen Rohrquerschnitt verteilt, so daß eine gute Werkstoffausnützung vorliegt.

In Bild 836 sind die Beanspruchungen eines Mehrlagenrohres im Ruhezustand und beim Schuß dargestellt.

Die Anzahl und die Länge der aufzuschrumpfenden Lagen richtet sich nach der Größe des Gasdruckes an der jeweiligen Stelle des Rohres. Dieser ist aus der Gasdruckkurve über der Rohrlänge zu ersehen (vgl. Bild 834).

Auf den Bildern 837 bis 841 sind verschiedene Ausführungsarten der Mehrlagenrohre dargestellt, die allerdings zum größten Teil der Vergangenheit angehören.

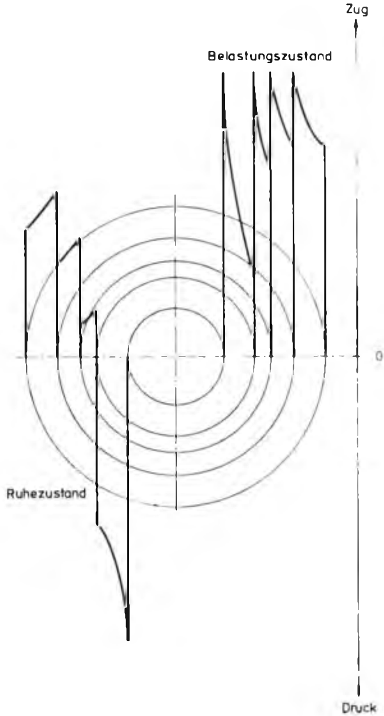


Bild 836. *Beanspruchungen eines Mehrlagenrohres im Ruhezustand und beim Schuß.*

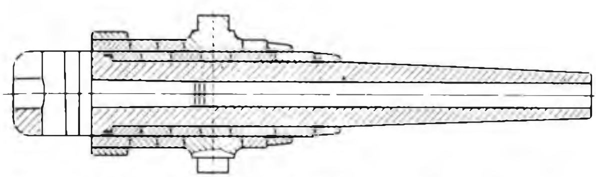


Bild 837. *Mehrlagenrohr mit aufgeschrumpften Ringen.*



Bild 838. *Mehrlagenrohr mit aufgeschrumpftem Mantel.*

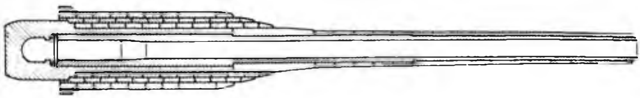


Bild 839. *Mehrlagenrohr mit aufgeschrumpften Mänteln und Ringen.*

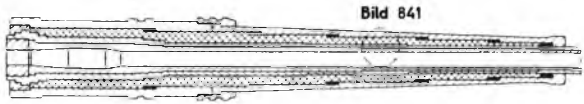


Bild 840. *Mehrlagenrohr mit zwei Mänteln und einer unter Zugspannung gewickelten Drahtlage aus Bandstahl.*

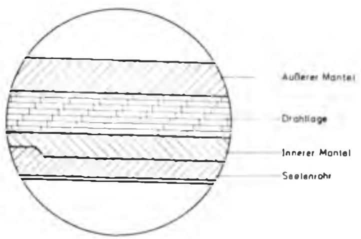


Bild 841. *Ausschnitt aus der Rohrwand des Mehrlagenrohres Bild 840.*

8.1.1.3. Vollrohre mit Autofrettage

Durch die Autofrettage oder Kaltreckung wird die Widerstandsfähigkeit der Vollrohre gegen den Gasdruck beim Schuß nach dem gleichen Grundprinzip erhöht, wie es bei den Mehrlagenrohren angewandt wird, d.h. es werden in den inneren Schichten der Rohrwand Druck-Eigenspannungen und in den äußeren Schichten Zug-Eigenspannungen erzeugt.

Da bei der Autofrettage der Spannungsverlauf in der Rohrwand nicht stufenweise aufgebaut wird wie bei den Mehrlagenrohren (vgl. Bild

836), sondern stetig (s. σ_V auf Bild 871 und 872), ist bei der Autofrettage eine noch gleichmäßigere Beanspruchung bzw. Ausnützung des ganzen Rohrquerschnittes zu erreichen.

Das Rohr wird bei der Autofrettage vor der letzten Fertigbearbeitung über die Streckgrenze hinaus belastet, z.B. durch Aufbringen eines hydraulischen Druckes im Rohrinneren. Bei dieser Belastung wird der innere und äußere Rohrdurchmesser etwa in gleichem Maße vergrößert, jedoch wächst die Dehnung und die Zugspannung infolge der verschieden großen Durchmesser bzw. Dehnungslängen in den inneren Rohrschichten schneller als in den äußeren. Die inneren Schichten werden zuerst über die Streckgrenze beansprucht und fließen. Je nach Autofrettagegrad wird durch weitere Druckerhöhung die Fließzone nach außen erweitert, bis, z.B. bei einem Autofrettagegrad 1,0, der ganze Rohrquerschnitt fließt. Es besteht jetzt in dem Querschnitt eine etwa gleichmäßige Streck- oder Fließgrenzenbeanspruchung (vgl. Bild 871). Die plastische Dehnung ist in den inneren Rohrschichten am größten und fällt nach außen stetig auf Null ab.

Beim Wegnehmen des Autofrettagedruckes würde die Außenschicht des Rohres wieder auf den Ausgangsdurchmesser zurückgehen, wenn die durch die plastische Verformung im Durchmesser bleibend vergrößerte Innenschicht keinen Widerstand entgegensetzen würde. Es entstehen jetzt in den äußeren Rohrschichten Zug-Eigenspannungen und in den inneren Rohrschichten Ruhe-Druck-Eigenspannungen, wobei sich in den mittleren Rohrschichten ein stetiger Übergang einstellt (vgl. Bild 872).

Beim Schuß tritt jetzt aufgrund der Druck-Eigenspannungen eine gleichmäßige Spannungsverteilung in der Rohrwand auf, so daß eine gute Ausnutzung der Materialquerschnitte gegeben ist (s. σ_V auf Bild 873).

Die bessere Spannungsverteilung in der Rohrwand durch die Autofrettage kann wie folgt genutzt werden:

kleinere Rohrwandstärke,
geringere Werkstoffstreckgrenze und damit Verringerung der Sprödbruchgefahr und Verlängerung der Ermüdungslebensdauer sowie höherer Gasdruck

als bei Vollrohren ohne Autofrettage.

Zu der Berechnung der Autofrettagerohre sowie der Sprödbruchgefahr und der Ermüdungslebensdauer siehe Abschnitt 8.1.7.

Die Rohre werden zum Zwecke der Kaltreckung bzw. Autofrettage hydraulisch aufgeweitet. Der Rohrteil, der gereckt werden soll, wird vorne und hinten abgedichtet und dann mit Drucköl beaufschlagt (Bild 842).

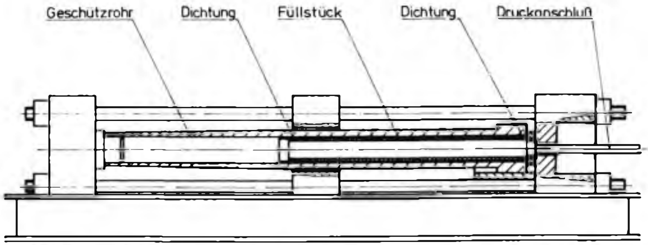


Bild 842. *Schematischer Aufbau für eine hydraulische Autofrettage.*

Bei einem anderen Verfahren, das heute weniger verwendet wird, werden hintereinander Stahlbolzen (Stopfen) von jeweils etwas größerem Durchmesser durch das Rohr getrieben (Stopfenzugverfahren).

8.1.1.4. Rohre mit auswechselbaren Futterrohren

Um ausgeschossene Rohre wieder brauchbar zu machen, wurden früher die Rohre ausgebohrt und anschließend, im allgemeinen auf der ganzen Seelenlänge, mit einem dünnen, nicht selbsttragenden Rohr ausgefüttert. Die Futterrohre wurden in das Mutterrohr eingeschrumpft oder eingepreßt. Dabei handelte es sich um ein recht langwieriges Verfahren.

Seit der Jahrhundertwende hat man die Futterrohre von vornherein konstruktiv vorgesehen, und zwar in zwei verschiedenen Ausführungsarten: als feste oder lose Futterrohre. Die Futterrohre können sich über die ganze Länge des Rohres, wie auf Bild 843, oder nur über hochbeanspruchte Teile erstrecken.

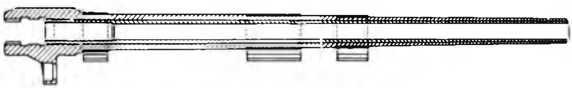


Bild 843. *Rohr mit durchgehendem Futterrohr.*

Feste Futterrohre sind außen meist leicht kegelig und enthalten den Ladungsraum und die Bohrung mit den Zügen. Sie werden durch Einpressen oder Einschrumpfen eingesetzt. Das Ausbauen eines abgenutzten Futterrohres geschieht ebenfalls wieder durch Erwärmen des Kernrohres und Wasserkühlung im Innern des Futterrohres oder durch Herauspressen in entgegengesetzter Richtung. Futterrohre dieser Art haben sich bewährt. Die Herstellung und der Ein- und Ausbau sind jedoch schwierig und aufwendig. Außerdem sind umfangreiche Werkstatteinrichtungen erforderlich, so daß sie nur in der Geschützfabrik ausgewechselt werden können. Für den Feldgebrauch mittlerer Kaliber wurden deshalb Rohre mit losen Futterrohren entwickelt.

Lose Futterrohre haben gegenüber den Kernrohren ein geringes radiales Spiel, so daß sie leicht, evtl. mit Hilfe eines transportablen hydraulischen Gerätes, ein- und ausgebaut werden können. Beim Schuß legt sich das Futterrohr nach einer begrenzten Aufweitung gegen die Wandung des Kernrohres an, so daß bei einer Steigerung des Gasdruckes beide Rohre zum Tragen kommen.

Als Beispiel für einen komplizierten Rohraufbau wird im Bild 844 ein fünfteiliger Aufbau eines Flakrohres aus dem Zweiten Weltkrieg gezeigt.

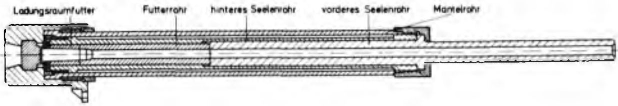


Bild 844. *Flakrohr mit fünfteiligem Rohraufbau.*

8.1.1.5. Auswechselbare Rohre

Bei Hochleistungsgeschützen mit einer relativ geringen Rohrlebensdauer, wie z.B. bei den Kampfpanzerbordkanonen, ist es erforderlich, daß ausgeschossene Rohre einfach und schnell gegen neue ausgewechselt werden können.

Bild 833 zeigt eine dementsprechende Rohrkonstruktion.

Das Rohr 1 ist mit dem Bodenstück 5 durch ein Bajonettgewinde 7 (Steckgewinde, siehe auch Bilder des Abschnittes Schraubverschlüsse, 8.1.2.3) verschraubt. Es genügt ein geringes Drehen des Rohres, um die Bajonettkämme des Rohres und des Bodenstückes auseinanderzubringen. Nunmehr kann das Rohr nach vorne aus der Jackenwiege herausgezogen werden.

Das Bodenstück wird während des Rohrwechsels durch eine entsprechende Vorrichtung in seiner Lage gehalten.

Bild 845 zeigt ein Mantelrohr mit lose eingesetztem Seelenrohr. Hierbei ist das Seelenrohr mit geringem radialen Spiel eingebaut und stützt sich beim Schuß gegen das Mantelrohr ab, oder das Seelenrohr ist selbsttragend und hat im Mantelrohr nur zwei kurze Lagerstellen (im Bild nicht dargestellt). In diesem Falle kann das Spiel zwischen Seelenrohr und den Lagerstellen größer sein, so daß die Herstellung der Lagerung billiger ist. In beiden Fällen ist ein einfacher und schneller Seelenrohrwechsel möglich.

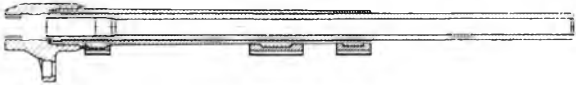


Bild 845. *Mantelrohr mit lose eingesetztem Seelenrohr.*

8.1.1.6. **Fertigung der Rohre**

Die vom Stahlwerk abgeschmiedeten, vorbearbeiteten und vergüteten Rohr-Rohlinge werden nach der amtlichen Abnahmeprüfung der mechanischen Werkstatt überstellt.

Nachdem am Außendurchmesser entsprechende Lagerstellen angedreht worden sind, erfolgt auf Bohrbänken das Aufbohren und Honen auf das genaue Kalibermaß sowie das Ausarbeiten des Ladungsraumes.

Die Züge werden auf besonderen Ziehbänken (Bild 846) in das Rohr eingeschnitten, wobei der mit vier bis acht Ziehmessern (von Zugbreite) versehene Ziehkopf der vorgesehenen Drallart entsprechend während des Zuges durch das Drall-Lineal gedreht wird. Schaltaggregate sorgen für die genaue Abstimmung der Bewegungen aufeinander wie Umschalten des Ziehkopfes entsprechend der Zahl der Züge, Steuerung der Ziehmesser gemäß der vorgeschriebenen Zugtiefe usw.

Das Ziehen ist eine der diffizilsten und teuersten Bearbeitungsvorgänge bei der Rohrfertigung; es erfordert erklärlicherweise Bearbeitungsmittel höchster Güte und Präzision sowie größte handwerkliche Fertigkeit und Gewissenhaftigkeit, besonders bei Rohren mit hoher Werkstoff-Festigkeit. Die Spanabführung durch das Bohröl mittels besonderer Spüleinrichtungen ist von großer Wichtigkeit; durch Messerbruch beim Ziehen kann u.U. das gänze Rohr unbrauchbar werden.

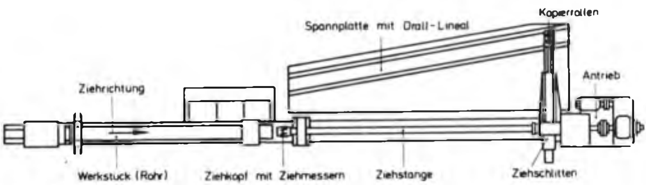


Bild 846. *Drallnutenziehbank (schematisch).*

Nach dem Ziehen erst erfolgt die weitere Bearbeitung des Rohres wie das Drehen der Außenform, das Fräsen von Flächen und Ausnehmungen, das Bohren und Gewindeschneiden usw.

Die Züge der Rohre kleinkalibriger Waffen werden in der Regel nicht eingeschnitten, sondern mit sog. Hämmermaschinen eingeschlagen.

In Bild 847 ist der schematische Schnitt durch eine „Ringläufermaschine mit vier umlaufenden Schlagbacken" bei der Bearbeitung eines vierzügigen MG-Rohres im Augenblick des Schlages dargestellt. Der Kern der Maschine mit den vier Hämmern 1 rotiert mit hoher Geschwindigkeit um das eingeführte Rohr 2; die im Rollenkäfig 3 gelagerten, im Laufring 4 ablaufenden acht Rollen 5 schlagen beim

Umlauf des Kerns auf die über die innere Abrollbahn der Rollen hinausragenden Nocken 6 der Hämmer, so daß diese um die Nockenhöhe nach innen getrieben werden und dabei die Züge in das Rohr einarbeiten. Bei einer Drehzahl des Kerns von 400 U/min werden die vier Hämmer etwa 1900mal in der Minute von den Rollen überrollt.

Diese spanlose Kaltformgebung besitzt die Vorteile kurzer Fertigungszeiten, hoher Maßgenauigkeit und – durch Gefügeverdichtung – hoher Oberflächengüte bei ungebrochenem Faserverlauf.

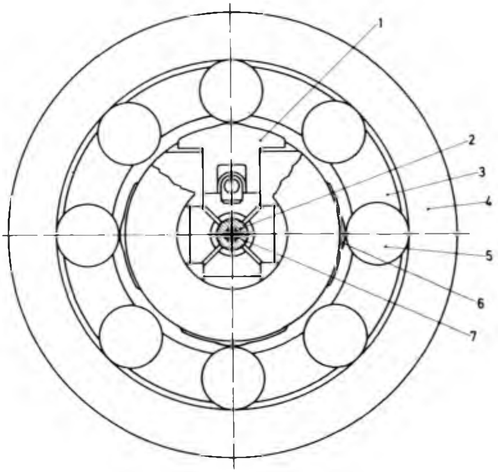


Bild 847. *Drallhämmermaschine.*

8.1.2. **Verschlüsse**

Die Verschlüsse haben folgende Funktionen:

Verschließen des hinteren Rohrendes,
Abdichten des Ladungsraumes nach hinten (Liderung),
Abfeuern der Treibladung und
Auswerfen der Hülsen.

Zu unterscheiden sind die Haupt-Verschlußarten:

Fester Rohrboden (etwa ab 1450),
Keilverschluß als Querverschluß (etwa ab 1870),
Schraubverschluß als Längsverschluß (etwa ab 1870),
Bodenverschluß als Querverschluß (1965).

8.1.2.1. Feste Rohrböden

Der feste Rohrboden wird seit dem 14. Jahrhundert bis heute (z.B. bei den Mörsern Bild 802 und 803) angewendet. Er ist der einfachste, leichteste und sicherste Verschluß des hinteren Rohrendes.

Neben diesen Vorteilen hat dieser Verschluß den Nachteil, daß das Rohr von vorne geladen werden muß, was noch eine ganze Reihe sonstiger Nachteile zur Folge hat (Abdichtung und Verdämmung nach vorne schwierig; Spiel zwischen Geschoß und Rohrwand; kein Drall, es sei denn, es werden Geschosse mit Warzen verschossen; schwieriges Rohrreinigen).

Bei den Mörsern mit kurzen Rohren, großer Erhöhung, kleiner v_0 und geringem Gasdruck wirken sich die Nachteile nicht so stark aus, so daß hier der Verschluß mit festem Rohrboden mit Vorteil zu verwenden ist.

8.1.2.2. Keilverschlüsse

Nach vielen Versuchen (seit dem 14. Jahrhundert), „Hinterladekanonen" mit Längs- oder Querverschlüssen zu bauen, ist es erst um die Mitte des 19. Jahrhunderts gelungen, Verschlüsse mit brauchbaren Dichtungen, sogenannten Liderungen (Abschnitt 8.1.2.5), herzustellen. An der Liderung waren alle früheren Konstruktionen gescheitert.

Es wurden zahlreiche Quer- und Längsverschlüsse entwickelt, wovon zwei Arten sich bis heute erhalten haben, nämlich der Flachkeilverschluß und der Schraubverschluß.

Bodenstücke
Die Hinterladerverschlüsse erfordern im allgemeinen ein besonders geformtes „Bodenstück" am hinteren Ende des Rohres oder Mantelrohres, welches größere radiale Abmessungen hat als das Rohr selbst. Früher hat man diese Bodenstücke mit dem Rohr zusammengeschmiedet (vgl. Bild 837 und 843). Heute werden die Bodenstücke aus Gründen der Fertigung, Auswechselbarkeit und der Festigkeit der Rohre auf das Rohr geschraubt, denn die hochbeanspruchten und durch Vergüten hochgezüchteten Rohre sind möglichst ohne harte Übergänge, Kerben, Verdickungen und Aussparungen auszuführen, insbesondere wenn diese sich nicht der allgemeinen Kreisform des Rohres anpassen.

Die Befestigung der Bodenstücke am Rohr geschieht entweder durch Spannschrauben in Verbindung mit einem Bund am hinteren Rohrende (Bild 832 und 848) oder durch eine Bajonettverschraubung (Steckgewinde, Bild 833).

Am Bodenstück sind die Rohrhalter befestigt, über die die Rohrbremse und der Rohrvorholer mit dem Rohr verbunden sind.

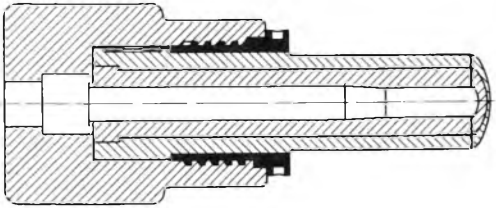


Bild 848. *Bodenstückbefestigung mit Rohrbund und Spannschraube.*

Heute wird der Querverschluß fast nur noch als *Flachkeil-Schubkurbelverschluß* ausgeführt. Der Verschlußkeil ist in der Grundform ein rechteckiger Block, der durch Verschieben in einer entsprechenden Bodenstückaussparung die hintere Rohröffnung verschließt bzw. für das Laden freigibt. Die Verschiebung des Keiles geschieht auf einer zum Seelenrohrende um etwa 1° 26′ geneigten Bahn, so daß er beim Schließen gegen das Rohrende bzw. gegen den Hülsenboden einer geladenen Patrone drückt. Der Verschlußkeil ist eigentlich selbst kein Keil.

Die Bewegung des Verschlußkeiles erfolgt durch einen Doppelhebel. Ein Arm bildet eine Handkurbel außerhalb des Bodenstückes, und der zweite Arm im Inneren des Bodenstückes hat an seinem Ende ein Gleitstück oder eine Rolle, die in eine Nut des Keiles eingreift, die so angeordnet ist, daß beim Drehen der Handkurbel der Verschlußkeil auf- oder zugeht.

Ein Hauptvorteil dieses Verschlusses besteht bei Munition mit Hülsen darin, daß auf dem letzten Teil des Schließvorganges die Schlagbolzenspitze erst dann gegenüber dem Zündhütchen stehen kann, wenn der Keil die Rohröffnung ganz verschlossen hat und außerdem formschlüssig verriegelt ist, indem der Gleitsteinarm etwa *in* der Keilbewegungsrichtung und die Nut etwa *senkrecht* zur Bewegungsrichtung des Keiles steht. Hierdurch ist es unmöglich, daß sich ein Schuß bei noch nicht ganz geschlossenem Rohr lösen kann.

Der Bewegungsrichtung des Verschlußkeiles entsprechend unterscheidet man

Horizontalkeilverschlüsse, wenn der Keil nach links oder rechts öffnet (Bilder 849, 850, 851, 852),
Fallkeilverschlüsse, wenn der Keil nach unten öffnet (vgl. Bild 833), und
Hubkeilverschlüsse, wenn der Keil nach oben öffnet (vgl. Bild 832).

Am einfachsten ist der Horizontalkeilverschluß aufgebaut. Das Keilgewicht bestimmt die Konstruktion der Bewegungsmechanik nur

hinsichtlich der Reibungskräfte und der Massenträgheit, die beide von der Erhöhung unabhängig sind.

Bei dem Fallkeilverschluß ist die Kraft beim Schließen größer als beim Horizontalkeilverschluß und beim Öffnen fällt der Keil mit Beschleunigung nach unten. Es müssen Ausgleichfedern und Dämpfungselemente vorgesehen werden. Bei großem Erhöhungsbereich kommt noch hinzu, daß die Kraftunterschiede mit zunehmender Erhöhung kleiner werden, was ebenfalls berücksichtigt werden muß.

Bei dem Hubkeilverschluß sind die Verhältnisse ähnlich, nur in umgekehrter Richtung.

Bei Geschützen mit schneller Feuerfolge wird das Öffnen und Schließen des Verschlusses automatisiert. Die Handkurbel ist in der Ruhelage von der Schubkurbelwelle getrennt. Dafür ist im allgemeinen ein weiterer Hebel mit der Schubkurbelwelle verbunden. Dieser Hebel schlägt beim Rück- oder besser beim Vorlauf gegen einen Anschlag an der Wiege, verdreht sich, öffnet den Keil und spannt gleichzeitig eine Feder. Diese Schließerfeder schließt den Keil wieder, wenn die Sperre des Verschlußkeiles durch den Hülsenrand der geladenen Patrone oder durch die Betätigung eines Handhebels gelöst wird.

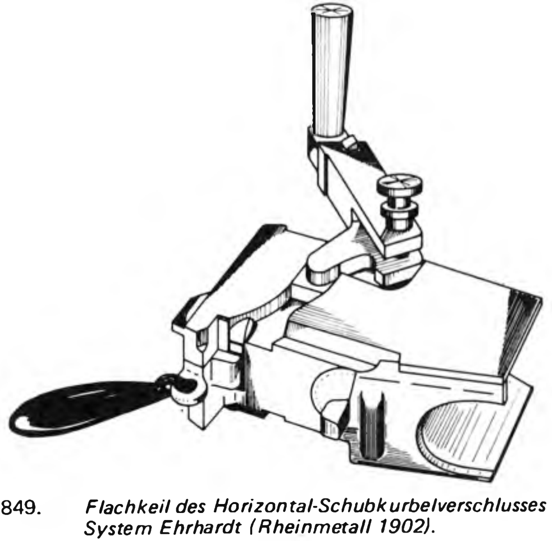


Bild 849. *Flachkeil des Horizontal-Schubkurbelverschlusses System Ehrhardt (Rheinmetall 1902).*

Vorteile des Keilverschlusses:

Der Keilverschluß ermöglicht eine schnelle Feuerfolge.

Die Sicherheit gegen ein Schießen mit nicht ganz geschlossenem Verschluß ist gewährleistet.

Der Bewegungsmechanismus ist verhältnismäßig einfach.

Er ist gut geeignet für eine automatische Betätigung.

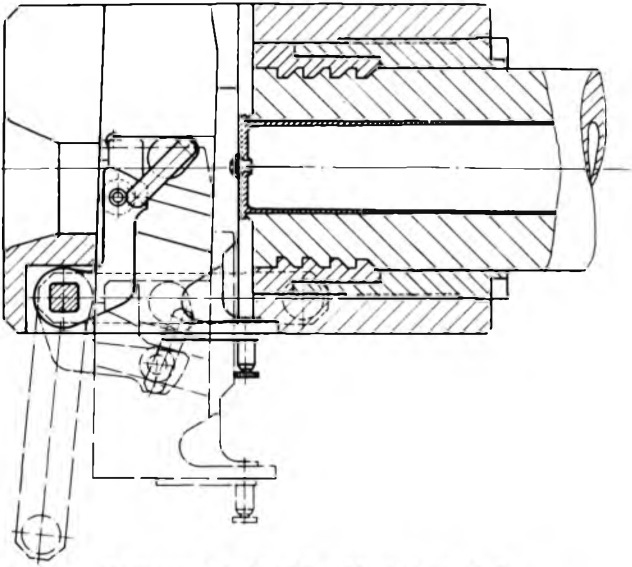


Bild 850. Horizontal-Flachkeil-Schubkurbelverschluß.

Nachteile des Keilverschlusses:

Der Keilverschluß läßt sich nicht auf einfache Weise mit der plastischen Liderung kombinieren (s. Abschn. 8.1.2.5). Bisherige Versuche ergaben äußerst komplizierte Konstruktionen.

Der Keilverschluß ist etwas schwerer und länger als der Schraubverschluß.

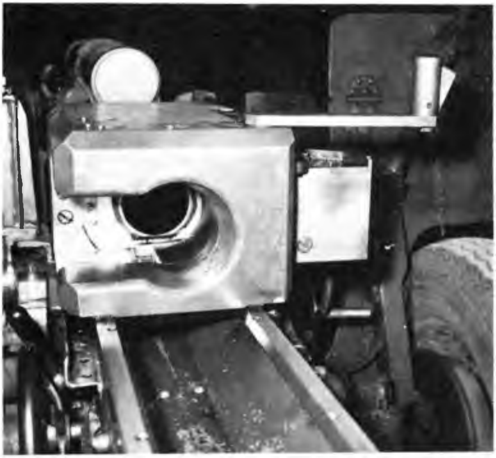


Bild 851. *Horizontalkeilverschluß mit Schubkurbel für Kaliber 105 mm (geöffnet).*

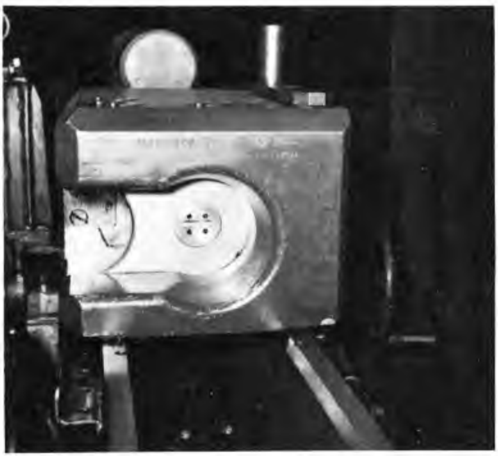


Bild 852. *Horizontalkeilverschluß mit Schubkurbel für Kaliber 105 mm (geschlossen).*

8.1.2.3. Schraubverschlüsse

Für die Schraubverschlüsse gelten die gleichen Ausführungen bezüglich der Verschlüsse für Hinterladerrohre sowie für die Bodenstücke, die als Einleitung des Abschnittes 8.1.2.2, Keilverschlüsse, gemacht wurden.

Bei den heutigen Schraubverschlüssen wird ein Verschlußstopfen, Verschlußblock genannt, mit einem Bajonettgewinde (Steckgewinde) axial in das hintere Ende des Rohres bzw. Bodenstückes gesteckt, durch Drehung verschraubt und verriegelt. Der Verschlußblock wird schwenkbar und drehbar von einem Verschlußträger getragen. Durch Betätigen eines Handgriffes wird die Steck- und Drehbewegung durchgeführt.

Um das Gewinde des Verschlußblockes auf einem möglichst großen Teil des Umfanges tragen zu lassen, ist es in seinem Durchmesser mehrfach abgestuft, so daß nur ein kleines Umfangsegment ohne Gewinde für das Einstecken der Gewindestufen mit dem größten Durchmesser erforderlich ist (Stufenschraube).



Bild 853. *Schraubverschluß für Kaliber 155 mm (geöffnet).*

Bilder 853 und 854 zeigen einen Schraubverschluß mit Dreifach-Stufenschraube für Kaliber 155 mm geöffnet und geschlossen.

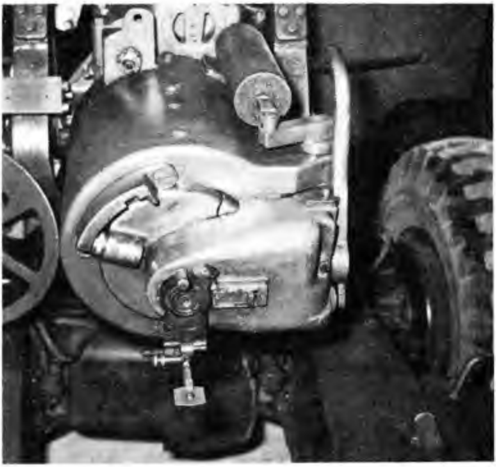


Bild 854. *Schraubverschluß für Kaliber 155 mm (geschlossen).*

Bild 855 stellt einen Schraubverschluß im Schnitt dar.

Auf Bild 856 (vgl. auch Bild 804) ist der Schraubverschluß des rückstoßfreien Leichtgeschützrohres zu sehen. Damit die Pulvergase aus der perforierten Patronenhülse nach hinten ausströmen können, sind der hintere Teil des Rohres und das Bodenstück 4 im Durchmesser wesentlich größer ausgeführt als die Patronenhülse. Die vier Düsen (Rückstrahlöffnungen) für das nach hinten strömende Pulvergas (bei geschlossenem Verschluß) sind auf beiden Bildern zu erkennen.

Die Schraubverschlüsse werden meist von Hand geöffnet und geschlossen.
Wenn sie automatisch betätigt werden müssen, etwa wegen Zusammenarbeit mit vollautomatischen Ladeeinrichtungen (Bild 895), sind aufwendige Konstruktionen erforderlich.

Ähnliches gilt auch für den Schraubverschluß auf Bild 814, der allerdings mit Gleitklauen 4 an zwei Schienen 2 an der Turmdecke beim Öffnen und Schließen entlanggleitet.

Vorteile des Schraubverschlusses:

Leichte und kurze Bauart,
verwendbar für alle Liderungsarten, vor allem für die plastische Liderung (s. Abschn. 8.1.2.5 und Bild 855).

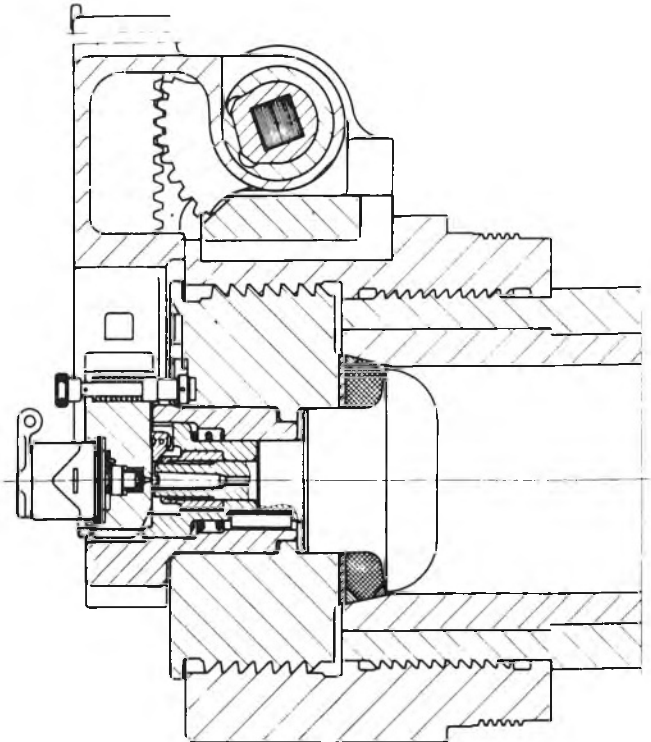


Bild 855. *Schraubverschluß mit plastischer Liderung und Treibladungsanzünder.*

Nachteile des Schraubverschlusses:

Die mit dem Schraubverschluß zu erreichende Feuerfolge ist relativ klein.

Der Mechanismus für das Öffnen, Schließen und Verriegeln ist komplizierter und langsamer.

Der Verschluß ist für das Automatisieren ungeeignet und führt zu komplizierten Konstruktionen.

Der Verschlußblock steht mit seiner Abfeuerungseinrichtung schon hinter der Treibladung, bevor er verriegelt ist. Durch Fehler im Gerät oder Bedienungsfehler könnte der Schuß bei nicht verriegeltem Verschlußblock fallen.

Die Herstellung ist aufwendig.

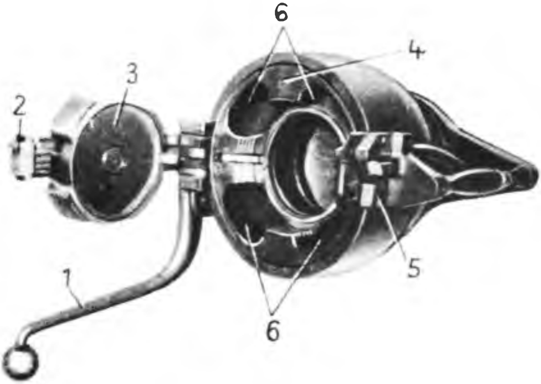


Bild 856. *Schraubverschluß des rückstoßfreien Leichtgeschützes (vgl. auch Bild 804);*
1 Öffnerhebel, 2 Verschlußgelenkplatte, 3 Verschlußblock, 4 Bodenstück, 5 Abzugsblock, 6 Rückstrahlöffnungen.

8.1.2.4. Bodenverschluß

Die Bilder 857 und 858 zeigen einen neuartigen Querverschluß, der mit einer Ladeeinrichtung kombiniert eine schnelle Feuerfolge ermöglicht.

Der Bodenverschluß umklammert U-förmig eine am hinteren Rohrende angeschmiedete rechteckige Führungsplatte, so daß er sich vertikal verschieben kann.

In der unteren Stellung deckt die hintere Wand des Verschlusses die hintere Öffnung des Rohres ab, wie es beim Keilverschluß die Vorderfläche des Verschlußkeiles tut. In der oberen Stellung geben die üblichen Aussparungen wie beim Verschlußkeil und Bodenstück des Keilverschlusses die Rohröffnung zum Laden frei.

In der hinteren Wand sind die Abfeuerungs- und Liderungselemente untergebracht, die sonst im Verschlußkeil angeordnet sind (auf den Bildern nicht eingezeichnet).

Geöffnet wird der Verschluß durch zwei Rollen, die beim Vorlauf des Rohres auf Auflaufschienen nach oben rollen und dabei den Bodenverschluß anheben. Nach dem Laden fällt der entriegelte Verschluß nach unten und verschließt das Rohr. (Wegen der Ladeeinrichtung siehe Abschn. 8.3).

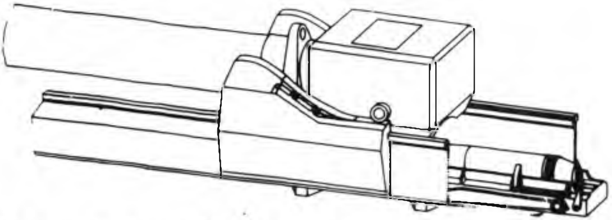


Bild 857. *Bodenverschluß (Ansicht).*

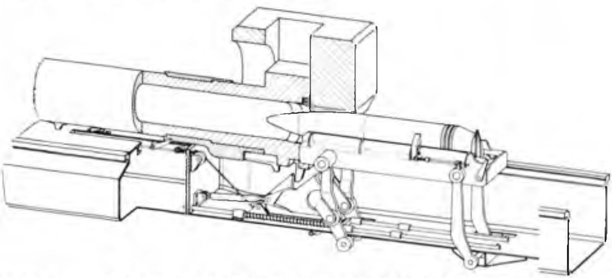


Bild 858. *Bodenverschluß mit Ladeeinrichtung (Schnitt).*

Vorteil des Bodenverschlusses:

Dieses Verschluß- und Ladesystem ergibt eine besonders große Feuergeschwindigkeit.

Nachteile des Bodenverschlusses:

Wie schon bei den Bodenstücken behandelt, ist die relativ dicke an das Rohr angeschmiedete Führungsplatte mit den starken Querschnittsveränderungen ungünstig.

Es ist eine besondere Rohrhaltekonstruktion zum Anschluß von Rohrbremse und Rohrvorholer am Rohr vorzusehen.

8.1.2.5. Liderungen

Das Dichten der Verschlüsse, die sogenannte Liderung, war und ist in Einzelfällen auch heute noch das große Problem bei den Verschlüssen

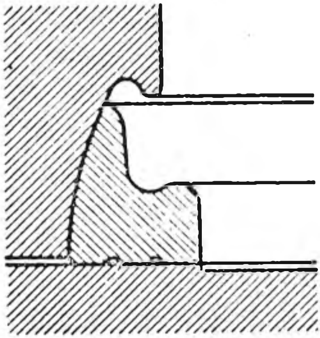


Bild 859.

Original-Broadwell-Liderungsring aus Stahl.

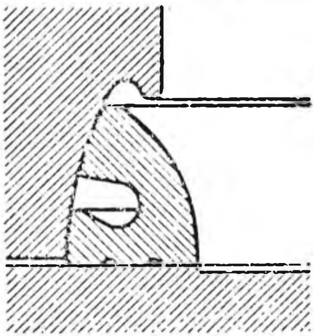


Bild 860.

Abwandlung des Broadwell-Ringes aus Stahl.

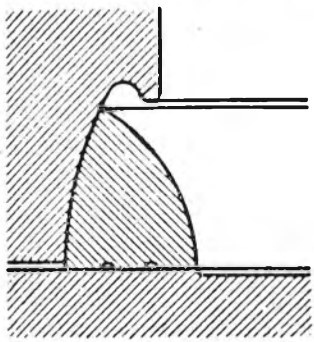


Bild 861.

Liderungsring aus Kupfer.

der Hinterladerrohre. Erst um die Mitte des 19. Jahrhunderts kamen brauchbare Liderungen auf und damit auch die Hinterladerrohre.

Von den unzähligen bis heute entwickelten Liderungen haben sich drei Arten erhalten, und zwar die

Ringliderung (Broadwell-Ringliderung, etwa ab 1860;
neue Ringliderung Rheinmetall, etwa ab 1940),

Plastische Liderung (Bangesche Liderung, ab 1876) und

Hülsenliderung (etwa ab 1880).

Ringliderungen

Ringliderungen werden im allgemeinen bei Keilverschlüssen und hülsenlosen Beuteltreibladungen verwendet.
Eine Anwendung bei Schraubverschlüssen ist möglich, aber nicht zweckmäßig.

Bild 859 zeigt den Original-Broadwell—Liderungsring aus Stahl. Die Ringe nach den Bildern 860 und 861 sind Abwandlungen.

Die Liderungsringe lagern im allgemeinen in einem Bodenring, der am Ende des Seelenrohres angebracht ist.

Die Ringe dichten den Verschluß, indem der Druck der beim Schuß entstehenden Pulvergase den Liderungsring gegen die Rohr- bzw. Bodenringwand und gegen den Keileinsatz preßt und dadurch die Fugen schließt.

Im Zweiten Weltkrieg entwickelte Rheinmetall für die 15 cm s.F.H. 18 einen Keilverschluß mit einem neuartigen Liderungsring, der für die Pz H 155 mm M109 G (Bild 823) weiterentwickelt wurde.

Bild 862 stellt diese Liderungskonstruktion dar. Der Liderungsring hat ein Winkelprofil, dessen Schenkel dünn sind, bei geöffnetem Keil etwas mehr als rechtwinklig zueinander stehen und in feinen Lippen auslaufen.

Diese Merkmale des neuen Liderungsringes bewirken, daß die Lippen bei geschlossenem Keil unter Vorspannung anliegen und die Dichtung auch bei kleinen Gasdrücken sofort eintritt.

Das Innere des Bodenringprofiles hat einen Wulst, der den Liderungsring beim Laden schützt und das Herausfallen der Treibladung bei großer Erhöhung verhindert, weil der Wulstring zum Rohr exzentrisch verläuft und der untere Teil des Wulstringes etwas in den Ladungsraumdurchmesser hineinragt. Der Wulst verhindert auch, daß die Treibladung auf dem Zündloch aufliegt.

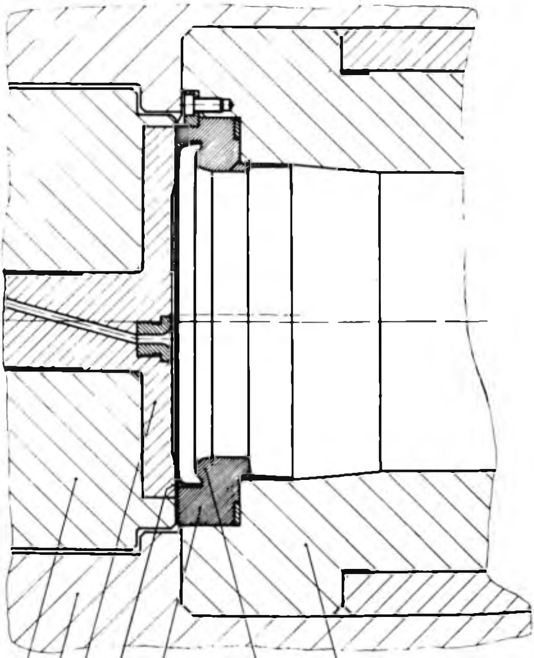


Bild 862. *Ringliderung, Konstruktion Rheinmetall;*
1 Rohr, 2 Bodenstück, 3 Verschlußkeil, 4 Keileinsatz, 5 Bodenring, 6 Wulst, 7 Liderungsring.

Vorteile der Ringliderung:

Sie ermöglicht, daß auch bei hülsenloser Treibladung der Keilverschluß mit allen seinen Vorteilen (s. Abschnitt 8.1.2.1) eingesetzt werden kann.

Einsparen der teuren und schweren Hülsen für die Treibladung.

Nachteil der Ringliderung:

Verschmutzung und Beschädigung müssen vermieden werden.

Plastische Liderungen

Plastische Liderungen werden heute noch in der fast gleichen Ausführung wie seit 1876 bei Schraubverschlüssen und hülsenlosen Treibladungen verwendet. Eine Anwendung bei Keilverschlüssen führt in der vorliegenden Form zu sehr komplizierten Konstruktionen.

Auf Bild 855 ist ein Schraubverschluß mit plastischer Liderung dargestellt.

In den Ladungsraum ragt der Liderungspilz. Beim Schuß drückt der Gasdruck den Pilz nach hinten, wobei der plastische Liderungsring je nach Stärke des Gasdruckes mehr oder weniger zusammengepreßt wird. Der Liderungsring gibt den Druck an die Rohrwand, den Pilz und den Verschlußblock weiter und dichtet dabei alle möglichen Spalten gegen den Gasdruck ab. Für die Dichtung ist günstig, daß der Druck in dem plastischen Liderungsring immer größer als der Gasdruck ist, und zwar im Verhältnis der Fläche des Pilzes zur Ringfläche des plastischen Liderungsringes.

Vorteile der plastischen Liderung:

Die Dichtung der plastischen Liderung ist gut und sicher.

Die Liderung ist relativ unempfindlich gegen Verschmutzung, und es kann bei geöffnetem Keil sowohl das Rohrende wie auch die Liderung gut übersehen und gereinigt werden.

Das Ladungsrohr ist glatt und ohne Einbauteile, die beim Laden verletzt werden könnten.

Nachteile der plastischen Liderung:

Diese Liderung konnte bisher nicht beim Keilverschluß eingeführt werden, so daß alle Nachteile des Schraubverschlusses in Kauf genommen werden müssen.

Das Seelenrohr ist geringfügig länger als im Falle der Ringliderung.

Hülsenliderungen

Durch die Hülsenliderung wird das Problem der Dichtung vom Verschluß auf die Munition übertragen. Beim Verschießen von Munition mit liderungsfähigen Hülsen preßt der Druck der Pulvergase die Wände der Hülse gegen die Ladungsraumwände, so daß eine vollständige und sichere Dichtung gegen die Pulvergase entsteht.

Die Hülsenliderung ist für alle Verschlußarten verwendbar.

Vorteile der Hülsenliderung:

Vollständige und sichere Dichtung.

Relativ geringe Empfindlichkeit gegen Schmutz und Beschädigung.

Keine Lebensdauerfragen für die Liderung, da sie bei jedem Schuß erneuert wird.

Große Feuergeschwindigkeit durch die Patronenmunition.

Einfacher Verschluß.

Einfache Abfeuerung.

Guter Schutz der Treibladung.

Nachteile der Hülsenliderung:

Kosten für die Hülsen.

Gewicht der Hülsen im Hinblick auf das Laden und den Nachschub, insbesondere bei größeren Kalibern.

Auffangen und Unterbringen der ausgeworfenen Hülsen bei geschlossenen Kampfräumen.

Beseitigung der CO-Gase aus den aufgefangenen Hülsen.

8.1.2.6. Abfeuerungen

Laut Munitionsblatt 1300-0102-1 vom Februar 1969 der Bundeswehr wird die *Verbrennung* der Treibladung durch *Anzündelemente* ausgelöst. (Die Auslösung einer *Detonation* geschieht durch *Zündelemente.)*

Das Anzünden der Treibladung, gegebenenfalls über eine Beiladung, geschieht in jedem Falle durch einen Treibladungsanzünder, der aus einem Anzündhütchen oder einer elektrischen Zündschraube und einer Verstärkungsladung besteht.

Bei den Abfeuerungen sind zu unterscheiden:

Abfeuerungen von Patronenmunition *mit* Treibladungsanzünder an der Patrone,

Abfeuerungen von getrennter Munition *ohne* Treibladungsanzünder an der Treibladung.

Abfeuerungen von Patronenmunition

Die Patronen-, Aufsteck- und Mörsermunition hat einen Treibladungsanzünder mit Anzündschraube und Verstärkungsladung (vgl. Bild 833), der in den Boden der Hülse oder des Leitwerkschaftes bei Mörsern eingeschraubt oder eingepreßt ist und der die Treibladung anzündet.

Keil-, Schraub- und Bodenverschlüsse haben eine Abfeuerungseinrichtung mit einem unter Federdruck stehenden Schlag- oder Zündbolzen (Bild 833), je nachdem, ob der Treibladungsanzünder ein Anzündhütchen hat, das durch einen Schlag gezündet wird, oder eine elektrische Zündschraube, die auf einen Stromstoß reagiert.

Der Schlagbolzen wird beim Öffnen des Verschlußkeiles nach hinten gezogen, wobei die Feder des Bolzens gespannt wird. In der Endstellung wird der Bolzen verriegelt.

Beim Abfeuern werden durch Abzugsleine, Abzugshebel, Abfeuerungsknopf und Elektromagnet der Schlagbolzen entriegelt, so daß er durch den Federdruck nach vorne schnellt und das mechanische Anzündhütchen des Treibladungsanzünders durch den Schlag zündet.

Im allgemeinen haben die Verschlüsse einen „Wiederspannabzug", mit dem das Spannen des Schlagbolzens auch ohne Öffnen des Verschlusses beliebig wiederholt werden kann.

Der Zündbolzen für die elektrische Zündschraube geht beim Öffnen des Verschlusses nach hinten, setzt sich beim Schließen auf die Zündschraube der Patrone und stellt damit die elektrische Verbindung für den Abfeuerungsstromstoß her.

Bei dem Mörser (Bild 803) als Vorderladerrohr mit festem Rohrboden-Verschluß ist am Rohrboden ein fester Schlagbolzen angebracht, auf den das Zündhütchen beim Einwerfen der Patrone in das Rohr auftrifft. Es gibt auch Mörser mit beweglichen Schlagbolzen, die ähnlich den bei den beweglichen Verschlüssen beschriebenen arbeiten.

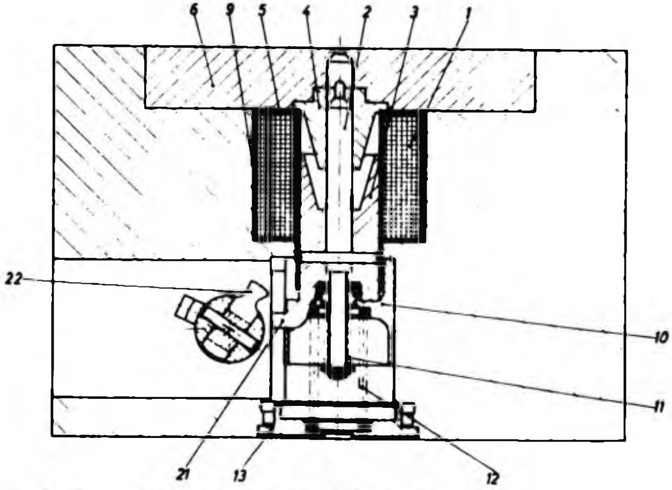


Bild 863. Elektromagnetische Abfeuerung.

Bild 863 zeigt eine elektromagnetische Abfeuerung, bei der die Schlagbolzenfeder durch einen Elektromagneten ersetzt ist, der im Augenblick der Abfeuerung durch Drucktaste unter Strom gesetzt wird und einen Anker mit Schlagbolzen gegen das Anzündhütchen schlagen läßt.

Auf Bild 864 ist ein Stoßgenerator zu sehen, der als Notabfeuerung von elektrischen Anzündschrauben dient, falls die Stromversorgung des Bordnetzes des Gerätes ausfällt.

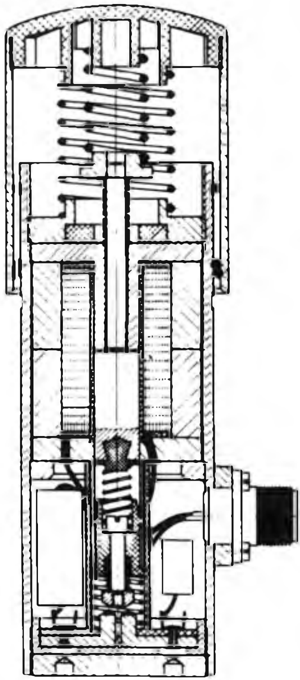


Bild 864.
Stoßgenerator als Notabfeuerung.

Mit einem kräftigen Stoß mit der Hand auf die obere Kappe wird ein Induktionsstrom erzeugt, der in einem Kondensator gepuffert wird, um zur elektrischen Anzündschraube abzufließen und die Anzündung der Treibladung auszulösen.

Abfeuerung von getrennter Munition

Die getrennte Munition mit ihren Beuteltreibladungen hat keinen Treibladungsanzünder. Sie verwendet einen separaten Treibladungs-

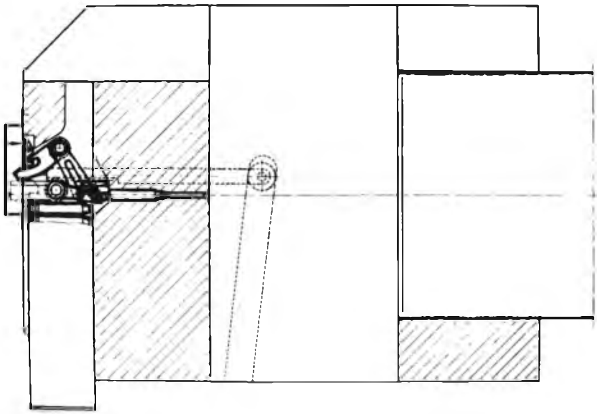


Bild 865. *Treibladungsanzünder-Abschußeinrichtung mit Magazin und automatischer Zuführung.*

anzünder (Zündhülse, Primer, Zündpatrone), der innerhalb des Verschlusses verschossen wird, wobei die Flamme der Verstärkungsladung des Primers durch einen Zündkanal die Beiladung und damit die gesamte Treibladung anzündet.

Der Primer gleicht in der äußeren Form den Hülsen der Patronen für Handfeuerwaffen. Im Bild 832 und 865 sowie auch im Bild 855 sind Primer-Abfeuereinrichtungen in einem Keilverschluß und in einem Schraubverschluß dargestellt. Die Verschlüsse auf Bild 832 und 865 haben Treibladungsanzünder-Magazine, aus denen automatisch nach jedem Schuß ein neuer Primer zum Abfeuern in das Patronenlager gebracht wird. Das Abfeuern der Primer erfolgt in ähnlicher Weise mit einem Schlagbolzen wie bei der Abfeuerung der Patronenmunition.

8.1.2.7. Hülsenauswerfer

Die Verschlüsse für Munition mit Hülsen haben einen Hülsenauswerfer, der nach jedem Schuß die Hülsen auswirft.

Der Auswerfer besteht aus zwei Doppelhebeln und ist im Bodenstück vor dem Verschlußkeil gelagert.

Die langen Hebelarme haben Auswerferkrallen, die nach dem Laden einer Patrone vor dem Hülsenbodenrand liegen, und Haken, die den Verschlußkeil nach dem Öffnen festhalten, damit die beim Öffnen

gespannte Verschluß-Schließerfeder den Keil nicht sogleich wieder schließt.

Gegen die kurzen Hebelarme der Doppelhebel schlagen beim Öffnen des Verschlußkeils zwei Nocken. Dieser Schlag auf die kurzen Hebelarme bewegt die langen Arme nach hinten, so daß die vor dem Hülsenrand befindlichen Auswerferkrallen die Hülsen mitnehmen und auswerfen.

Zum Schließen des Verschlusses werden die den Keil haltenden Auswerferhaken nach vorn geschwenkt. Das geschieht beim Laden durch Anschlag des Hülsenbodens gegen die Auswerferkrallen oder beim Schließen des Verschlusses ohne Laden durch einen Handhebel.

8.1.3. Mündungsbremsen

Die Mündungsbremsen werden an der Mündung der Geschützrohre angebracht (Bilder 806 bis 810, 815 bis 820, 823 und 832). Sie haben den Zweck, die Rücklaufenergie des Geschützrohres, die beim Schuß entsteht, klein zu halten und damit die Brems-Rückstoßkraft auf das Geschütz zu verringern. Dies wird dadurch erreicht, daß man die an der Rohrmündung ausströmenden Pulvergase auf Prallflächen der Mündungsbremse auftreffen läßt. Die Gase werden dabei möglichst weitgehend nach hinten abgelenkt und erzeugen auf die Mündungsbremse eine Kraft nach vorne, die das nach hinten zurücklaufende Rohr abbremst.

Die Wirkung der Mündungsbremse wird teilweise dadurch begrenzt, daß keine Belästigung der Geschützbedienung oder Schäden an der Waffe durch zu weit nach hinten abgelenkte Pulvergase entstehen dürfen.

Die Mündungsbremsen können *einen* Satz von Prallflächen (Einkammer-Mündungsbremsen) oder *mehrere* Sätze von Prallflächen haben (x-Kammer-Mündungsbremsen).

Ausführliches über die Wirkung und Berechnung der Mündungsbremsen siehe Abschnitt 9.7 und 8.2.1.1.

8.1.4. Rauchabsauger

Der Rauchabsauger (Bilder 808, 810, 812, 813, 823 und 833) wird bei Geräten mit geschlossenem Kampfraum am Rohr angebracht, um die nach dem Schuß noch im Rohr befindlichen Gase nach vorne abzusaugen, damit beim Öffnen des Verschlusses keine schädlichen Pulvergase in den Kampfraum dringen.

Die Arbeitsweise des Rauchabsaugers sei anhand des Schnittbildes 866 erläutert. Das Geschoß läuft von links nach rechts durch das Rohr. Sobald das hintere Ende des Geschosses die schrägen Kanäle im Rohr

freigibt, strömt Pulvergas in die Druckkammer. Wenn das Geschoß das Rohr verläßt, sinkt der Druck der Pulvergase im Rohr, und die Gase, die in der Kammer unter Druck stehen, strömen durch die schrägen Bohrungen auf die Rohrmündung zu und reißen die Pulvergase im Rohr mit nach vorne ins Freie, besonders wenn der Verschlußkeil sich öffnet (Injektorwirkung).

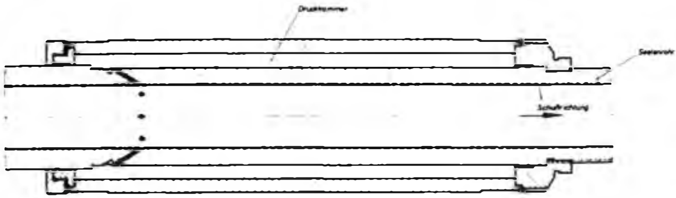


Bild 866. *Rauchabsauger (Schnitt).*

8.1.5. Wärmeschutzhüllen

Geschützrohre, insbesondere lange, schlanke Kanonenrohre, verbiegen sich bei Temperaturunterschieden an der Oberfläche, was zur Verminderung der Treffgenauigkeit führt.

Wenn zum Beispiel die Sonne einseitig auf ein kaltes Rohr scheint oder kalter Wind ein warmes Rohr anbläst, wird sich die erwärmte Seite des Rohres dehnen bzw. die abgekühlte Seite zusammenziehen, was eine Verbiegung des Rohres bedeutet. Um dies zu vermeiden, erhalten Rohre eine wärmeisolierende Schutzhülle.

Das Rohr auf Bild 833 hat eine Wärmeschutzhüllen-Konstruktion aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK).

8.1.6. Berechnung der Geschützrohre

Aufgabe der Festigkeitsberechnung der Geschützrohre ist, unter Berücksichtigung der ballistischen und konstruktiven Erfordernisse entweder bei einem gegebenen Gasdruckverlauf längs des Rohres die Rohrwanddicke zu optimieren und dann den Rohrwerkstoff zu bestimmen oder aber für bestimmte Rohrabmessungen und einen bestimmten Werkstoff den zulässigen Gasdruckverlauf festzulegen, wobei in beiden Fällen für das Geschützrohr eine ausreichende Sicherheit gegen spontanes Zerlegen, Reißen infolge Werkstoffermüdung und unzulässige bleibende Formänderungen gewährleistet sein muß. Darüber hinaus werden die Rohraufweitungen bei elastischer Dehnung unter Schußgasdruck und die Wärmedehnung bestimmt.

Für autofrettierte Rohre werden zusätzlich die für den Autofrettagevorgang erforderlichen Kennlinien berechnet (s. 8.1.6.2, Berechnung der Vollrohre mit Autofrettage).

Je nach Geschütztyp, Ladung und Geschoßmasse entstehen beim Schuß maximale Gasdrücke zwischen 200 und 7000 bar.

Die Festigkeitsberechnung richtet sich nach der Munitionsart, die in dem zu berechnenden Rohr die höchsten Gasdrücke erzeugt.

Die Spitzenwerte des zeitlichen Gasdruckverlaufs sind von Rohrhinterkante bis zu einer bestimmten Stelle weiter vorn gleich hoch. Von dieser Stelle an nach vorn hin nimmt der Gasdruck ab. Die Festigkeitsberechnung ist also für alle die Querschnitte längs des Rohres getrennt durchzuführen, bei denen sich unterschiedliche Beanspruchungen entsprechend dem dort herrschenden Gasdruck, den dort vorhandenen Rohrabmessungen (innen, außen, ggf. geschwächt durch Querbohrungen in der Rohrwand oder gestützt durch das Bodenstück) und dem dort ggf. vorhandenen Eigenspannungszustand ergeben.

Bei der Angabe von Gasdrücken laut nachstehender Aufstellung handelt es sich um die zeitlichen Spitzenwerte im hinteren Rohrabschnitt, der vom vollen Gasdruck beaufschlagt wird.

Konstruktionsgasdruck,

das ist der theoretische Gasdruck, bei dem eine schädliche bleibende Formänderung gerade noch vermieden würde.

Abnahmegasdruck (bzw. Gasdruck eines Überdruckbeschusses),

das ist der Gasdruck, mit dem das neue Geschützrohr und der Verschluß ein- oder mehrmals belastet werden, um deren Sicherheit zu überprüfen und örtliche Spannungskonzentrationen, die die Ermüdungslebensdauer beeinträchtigen könnten, abzubauen. Dieser Gasdruck liegt unterhalb des Konstruktionsgasdrucks, jedoch über dem maximal zulässigen Gasdruck. Der Gasdruck einer besonderen Überdruckmunition soll also so eingestellt sein, daß er mit 99,7% Wahrscheinlichkeit, d. h. mit seinem Streuband, das durch die dreifache Standardabweichung[1]) des Überdrucks ($\pm$ $3\,\sigma$ (ü)) um den mittleren Abnahmegasdruck nach oben und unten begrenzt ist, in den Bereich zwischen Konstruktionsgasdruck und maximal zulässigem Gasdruck (ggf. plus Sicherheitsspanne) fällt.

---

1) Siehe Abschnitt 5, Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung, und DIN 1319, Bl. 3.

Maximal zulässiger Gasdruck;

dieser Gasdruck darf außer bei der Abnahme auch unter ungünstigen Bedingungen nicht überschritten werden. Der Sicherheitsabstand zum Konstruktionsgasdruck beträgt bei Panzerkanonen etwa 5% des Konstruktionsgasdrucks, bei Haubitzen aus Rücksicht auf die Ermüdungslebensdauer etwa 10%, bei dünnwandigen Rohren bis zu 40%.

Dieser maximal zulässige Gasdruck ist praktisch gleich der oberen Grenze des 99,7%igen Streubandes bei maximaler Pulvertemperatur (für Geschütze in gemäßigten Klimazonen 50°C bzw. 40°C bei Raketengeschossen), d. h. er liegt um die dreifache Standardabweichung des Gasdrucks bei 50°C (bzw. 40°C) über dem Gasdruck bei 50°C (bzw. 40°C).

Mittlerer Gasdruck bei 50°C PT[1],

liegt um 3σ der Gasdruckwerte bei 50°C PT unter dem maximal zulässigen Gasdruck und sollte als Bezugswert für die Ermüdungslebensdauer verwendet werden.

Gebrauchsgasdruck bei 21°C PT

ist der mittlere Gasdruck bei 21°C Pulvertemperatur; dieser Gasdruck sollte unter mitteleuropäischen Verhältnissen als Bezugswert für die Verschleißlebensdauer der Geschützrohre verwendet werden.

Da die modernen Geschützbaustähle unter den dynamischen Verhältnissen eines Schusses eine Streckgrenze aufweisen, die nur sehr wenig über der statisch gemessenen liegt, wird die Festigkeitsberechnung auf den wahren Gasdrücken aufgebaut, die am genauesten piezoelektrisch gemessen werden können. Bei einigen Erprobungsvorhaben ist die weniger aufwendige Gasdruckmessung mit Kupferstauchkörpern weiterhin üblich. Da die Kupferstauchkörper nicht nur auf den Spitzengasdruck, sondern auch auf den zeitlichen Verlauf des Gasdrucks reagieren und das im Herstellerwerk der Kupferstauchkörper angewandte Eichverfahren auf den Gasdruckverlauf im Geschützrohr nicht exakt abgestimmt ist, liegt der sogenannte Kupfergasdruck p_{Cu} erfahrungsgemäß häufig unter dem sogenannten Piezogasdruck p_{piezo}. Durch gleichzeitige Messung von p_{Cu} und p_{piezo} kann für ein bestimmtes Geschütz eine Beziehung zwischen beiden Werten ermittelt werden.

8.1.6.1. Berechnung der Vollrohre ohne Autofrettage

Der Gasdruck erzeugt in der Rohrwandung einen dreiachsigen Spannungszustand, wobei Tangential- und Radialspannungen bei weitem größer als die Längsspannungen sind, so daß mit hoher Genauigkeit die

1) PT = Pulvertemperatur

Beziehungen für den zweiachsigen Spannungszustand zugrunde gelegt werden können. Die Längskräfte erreichen allerdings am vorderen Ende der Rohrverschraubung mit dem Bodenstück beträchtliche Werte, bei bestimmten Geschützen bis zu 10000 N und mehr. Diese Kräfte sind bei der Berechnung der Rohrverschraubung mit dem Bodenstück zu beachten.

Zur Rohrmündung hin werden diese Kräfte jedoch durch die in der Rohrwand durch die Rohrrücklaufbeschleunigung auftretenden d'Alembertschen Trägheitskräfte abgebaut.

Weniger bekannt ist, daß bei bestimmten Geschoßarten der radiale Führungsbanddruck erhebliche Tangential- und Radialspannungen erzeugen kann.

Bei gezogenen Rohren tritt die sogenannte Leistenkraft an der Rohrinnenwand in tangentialer Richtung auf, so daß auf das Rohr ein Drallmoment ausgeübt wird, das an der Rohrlagerung aufgefangen werden muß.

Einige Geschütze besitzen eine Mündungsbremse, die kurz nach dem Geschoßaustritt aus dem Rohr über eine Verschraubung beträchtliche Zugkräfte auf das Rohr überträgt.

Bei der Festigkeitsrechnung weniger bedeutsam sind die Reibungskräfte zwischen Geschoß und Rohrinnenwand sowie die Kolbenstangenkräfte von Rohrbremse und Rohrvorholer. Weniger ins Gewicht fallen bei der Rohrberechnung auch die Biegemomente auf das Rohr infolge Eigengewicht und Fahrbeschleunigungen.

Für die Berechnung der Geschützrohre unter der Wirkung des maximalen Gasdrucks p_{max} (piezoelektrisch gemessener Gasdruck p_{piezo}) wird unter Verwendung vereinfachender Beziehungen die Gestaltänderungsenergie-Hypothese herangezogen.

Für den zweiachsigen Spannungszustand ergibt sich die Vergleichsspannung

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \tag{1}$$

mit σ_1 und σ_2 als den beiden Hauptspannungen.

Fließen des Werkstoffes tritt ein, wenn $\sigma_V > \sigma_S$, wobei σ_S die Streckgrenze des Werkstoffes ist. Bei Rohrstählen mit wenig ausgeprägter Streckgrenze verwendet man statt dessen den Wert $\sigma_{0,2}$, die 0,2-Grenze.

σ_1 ist hier die Tangentialspannung,

σ_2 die Radialspannung.

Für den praktischen Gebrauch wird folgende vereinfachte Beziehung benutzt:

$$\sigma_V = \frac{1}{b}(\sigma_1 - \sigma_2) \tag{2}$$

mit $b = 0{,}22u + 0{,}78$ für $u < 1{,}5$

und $b = 1{,}11$ für $u \geqslant 1{,}5$,

wobei $u = \frac{d_a}{d_i}$ mit d_a = Außendurchmesser,
d_i = Innendurchmesser.

Für dickwandige Rohre unter Innendruck ohne Autofrettage ergibt sich [1], [2]

$$\sigma_t = p\,\frac{1}{u^2 - 1}\,\frac{u_x^2 + u^2}{u_x^2}\,, \tag{3}$$

$$\sigma_r = p\,\frac{1}{u^2 - 1}\,\frac{u_x^2 - u^2}{u_x^2} \tag{4}$$

mit p = Innendruck,

$u_x = \frac{d_x}{d_i}$,

d_x = variabler Durchmesser innerhalb der Wandung.

Die Tangentialspannung erreicht an der Innenoberfläche des Rohres ihren Höchstwert

$$\sigma_{t,max} = p_{max}\frac{u^2 + 1}{u^2 - 1}\,. \tag{5a}$$

Die Radialspannung besitzt an der Außenseite den Wert Null und sinkt zur Innenseite hin allmählich auf die Spannung

$$\sigma_{r,min} = -p \tag{5b}$$

ab.
Ein Trennbruch setzt ein, wenn die auftretenden Zugspannungen an irgendeiner Stelle die Zugfestigkeit σ_B überschreiten.

Bei dickwandigen Rohren tritt bei Überlastung stets zunächst ein Fließen von der Innenoberfläche nach außen fortschreitend ein, ehe ein Trennbruch erfolgt.

Aus Bild 835 (S. 292) erkennt man die relativ schlechte Werkstoffausnutzung bei einem nicht autofrettierten dickwandigen Rohr.

Die Belastbarkeit eines Geschützrohres ist im allgemeinen begrenzt durch die Forderung, daß die bleibende Formänderung beim Konstruktionsgasdruck einen zulässigen Wert, z.B. 0,1 mm des Ladungsraumdurchmessers, nicht übersteigen soll. Deshalb werden auch Vollrohre ohne Autofrettage zur Bestimmung des Konstruktionsgasdrucks im Anschluß an die Berechnung desjenigen Gasdrucks, bei dem an der Rohrinnenwand die Vergleichsspannung gerade $\sigma_{0,2}$ erreicht, einer Berechnung auf Selbstautofrettage nach dem unter 8.1.6.2 beschriebenen Verfahren unterzogen unter der Voraussetzung, daß bei Konstruktionsgasdruck eine geringfügige Durchmesseraufweitung zugelassen wird.

Die elastische Dehnung ϵ des Geschützrohres aus einem Werkstoff mit dem Elastizitätsmodul E und der Poissonschen Konstante ν (ν = 0,3) beträgt unter dem Gasdruck p

innen: $$\epsilon_{ti} = \frac{\Delta d_i}{d_i} = \frac{p}{E} \left(\frac{u^2+1}{u^2-1} + \nu\right),$$

außen: $$\epsilon_{ta} = \frac{\Delta d_a}{d_a} = \frac{2p}{E\,(u^2-1)} .$$

Δd_i bzw. Δd_a sind die Aufweitungen innen bzw. außen.

Am hinteren Rohrende ist die Rohraufweitung gegebenenfalls durch das Bodenstück behindert und damit geringer. In diesem Fall berechnet man zunächst den Zwischendruck $p_{zwischen}$, bei dem das Spiel zwischen Rohr und Bodenstück durch Rohraufweitung außen gerade überwunden wird, und addiert die Aufweitung von Rohr und Bodenstück gemeinsam unter dem Differenzdruck $p_{max} - p_{zwischen}$ hinzu.

8.1.6.2. **Berechnung der Vollrohre mit Autofrettage**

Durch die Autofrettage kann eine gleichmäßige Spannungsverteilung beim Schuß über den gesamten Rohrwandquerschnitt erzielt werden. Dabei wird das Rohr von der Innenoberfläche bis zum Durchmesser d_n plastisch verformt, während der Bereich vom Durchmesser d_n bis zum Außendurchmesser im elastischen Bereich verbleibt.

Die plastische Verformung setzt ein, wenn der Innendruck den Wert

$$p_I = \frac{b}{2} \sigma_S \frac{u^2 - 1}{u^2} \tag{6}$$

überschreitet.

Beim theoretischen Druck $p_{II} = b \cdot \sigma_S \ln u$ (7)

wird der vollplastische Zustand erreicht. Praktisch liegt p_{II} höher als der theoretische Wert, da sich der Werkstoff während des Fließvorgangs verfestigt. Deshalb wird während des Autofrettagevorgangs die Dehnung des Rohraußendurchmessers als maßgebliche Größe überwacht.

Mit steigendem Autofrettagegrad

$$c = \frac{d_n - d_0}{d_1 - d_0}, \tag{8}$$

wobei d_0 der Innendurchmesser und d_1 der Außendurchmesser des Autofrettagerohres ist, verschieben sich die Maxima der Tangential- und Radialspannungen beim Autofrettieren immer mehr von innen nach außen. Die höchsten Zugspannungen treten im vollplastischen Zustand außen auf. Ein etwaiger Trennbruch schreitet also von außen nach innen fort.

Im Hinblick auf das Formänderungsvermögen des Werkstoffs und die Formerhaltung sollte die Dehnung der Rohrinnenoberfläche das 2- bis 3fache der Dehnung bei Erreichen der Streckgrenze nicht übersteigen.

Die gebräuchlichen Autofrettagegrade im höchstbeanspruchten Querschnitt der Geschützrohre liegen zwischen c = 0,6 und 1,0.

Bei der Autofrettageberechnung ermittelt man zunächst die Tangential- und Radialspannungen an Innen- und Außenoberfläche des Autofrettagerohres, die sich beim Erreichen eines bestimmten Autofrettagegrades einstellen. Mit der Radialspannung innen hat man auch den erforderlichen (theoretischen) Autofrettagedruck.

Aus dem Verlauf der Tangentialspannung und Radialspannung über den Rohrquerschnitt unter Autofrettagedruck erhält man die Spannungen für Innen- und Außendurchmesser des späteren Fertigteils sowie bei d_n.

Anschließend errechnet man die im Autofrettagerohr unter Autofrettagedruck vorhandenen elastischen Spannungen unter der Annahme, daß das Autofrettagerohr nach Wegnahme des Autofrettagedrucks rein elastisch zurückfedert, als sei es vorher elastisch bis zum Autofrettagedruck belastet worden.

Aus der Differenz der Gesamtspannungen unter Autofrettagedruck und der elastisch nach Wegnahme des Autofrettagedrucks abgebauten Spannungen erhält man die im nicht belasteten Autofrettagerohr verbleibenden Restspannungen.

Im nächsten Schritt ermittelt man den auf das Fertigrohr entfallenden Anteil der bei Wegnahme des Autofrettagedrucks freiwerdenden elastischen Spannungen und subtrahiert diese von den Spannungen unter Autofrettagedruck am Innen- und Außendurchmesser für das spätere Fertigrohr. Damit kennt man die Restspannungen im Fertigrohr.

Der letzte Schritt ist die Überlagerung der beim Schuß auftretenden elastischen Spannungen mit den Restspannungen im Fertigrohr.

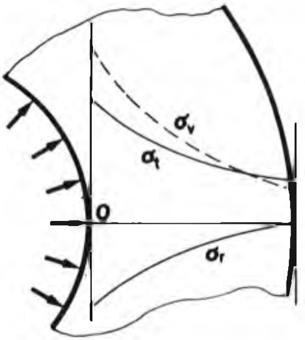


Bild 867.

Spannungen im Rohr ohne Autofrettage beim Schuß.

Bild 867 zeigt den Verlauf der Tangential-, Radial- und Vergleichsspannung bei einem nicht autofrettierten Rohr, bei dem die Vergleichsspannung an der Rohrinnenoberfläche den höchsten Wert erreicht.

Die Bilder 868, 869 und 870 beziehen sich auf ein autofrettiertes Rohr mit einem Autofrettagegrad c = 0,60. In Bild 868 ist der Spannungsverlauf unter dem höchsten Autofrettagedruck dargestellt. Bild 869 gibt die im entlasteten Rohr verbleibenden Restspannungen wieder, Bild 870 den Spannungsverlauf unter Schußbelastung.

Auf den Bildern 871, 872 und 873 sind die entsprechenden Spannungen bei einem vollplastifizierten Rohr (Autofrettagegrad 1,0) dargestellt.

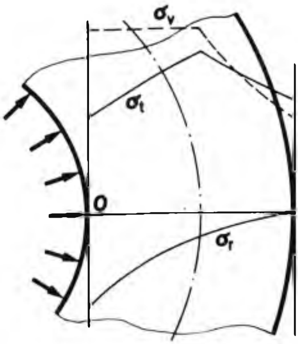


Bild 868. *Spannungen im Rohrrohteil bei Autofrettagedruck; Autofrettagegrad c = 0,6.*

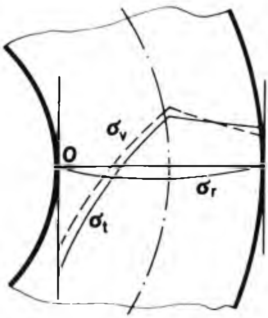


Bild 869. *Eigenspannungen im Rohrrohteil mit Autofrettage; Autofrettagegrad c = 0,6.*

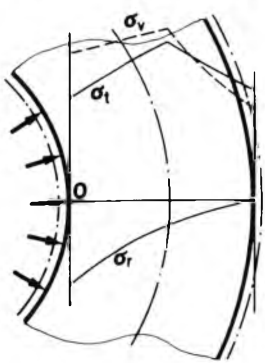


Bild 870. *Spannungen im Fertigrohr mit Autofrettage beim Schuß; Autofrettagegrad c = 0,6.*

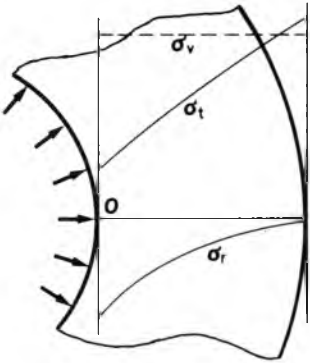


Bild 871. *Spannungen im Rohrrohteil bei Autofrettagedruck; Autofrettagegrad c = 1,0.*

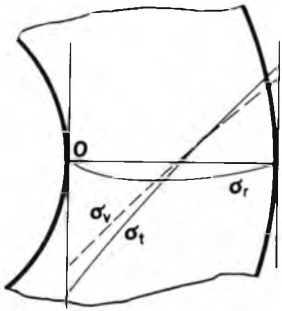


Bild 872. *Eigenspannungen im Rohrrohteil mit Autofrettagegrad c = 1,0.*

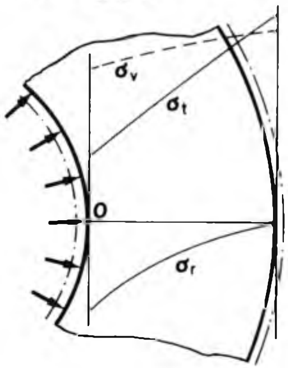


Bild 873. *Spannungen im Fertigrohr mit Autofrettage beim Schuß; Autofrettagegrad c = 1,0.*

Beim Autofrettagevorgang werden mit Hilfe von x-y-Schreibern die Verläufe der Durchmesseraufweitung an verschiedenen Querschnitten als Funktion des Autofrettagedrucks auf vorbereiteten Diagrammen aufgezeichnet und mit den berechneten Kurven verglichen (s. Bild 873a). Da jedes Rohr innerhalb einer Toleranzbreite einen anderen $\sigma_{0,2}$-Wert besitzt, enthält das vorbereitete Diagrammblatt Kurvenscharen für verschiedene $\sigma_{0,2}$-Werte. Außerdem sind Linien gleichen Autofrettagegrades eingetragen.

Nach Wegnahme des Autofrettagedrucks erreicht die tatsächlich gefahrene Kurve einen Punkt auf der Achse für die Durchmesseraufweitung, der der bleibenden Durchmesseraufweitung entspricht.

Die elastische Rohraufweitung beim Schuß ist bei autofrettierten Rohren gleich derjenigen nicht autofrettierter Rohre gleicher Abmessungen.

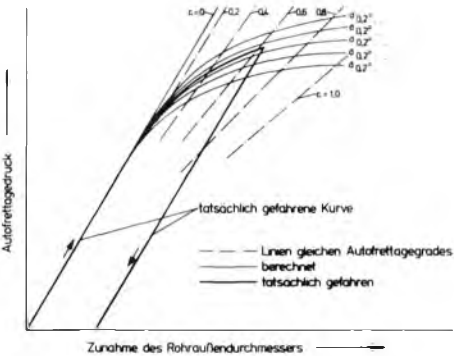


Bild 873a. *Autofrettagediagramm.*

8.1.6.3. **Berechnung der Keilverschlüsse** (Bild 874)

Die maximale Kraft auf den Verschlußkeil ergibt sich aus dem Produkt aus maximalem Gasdruck mal der Querschnittsfläche des hinteren Ladungsraumendes. An den Auflageflächen des Verschlußkeiles auf das Bodenstück herrscht insgesamt eine um die d'Alembertsche Trägheitskraft des Verschlußkeiles kleinere Kraft.

Die Kraft auf die Rohrverschraubung ist um die Trägheitskraft des Bodenstückes kleiner als die Keilauflagekraft.

Mit den Abkürzungen

p_{max}	=	maximaler Gasdruck,
D_L	=	hinterer Ladungsraumdurchmesser,
m_R	=	Masse der rücklaufenden Teile (Rohr mit Verschluß, Mündungsbremse, Kolbenstangen von Rohrbremse und Vorholer, ggf. Gleitschuhe),
m_K	=	Masse des Verschlußkeiles,
D	=	Kaliber,
m_I	=	Masse des Bodenstücks hinter I-I,
F_W	=	Querschnittsfläche der Wange bei I-I,
h	=	Hebelarm = Abstand des mittleren Angriffspunktes von $P_2/2$ von der Mittellinie des Rechteckquerschnittes I-I,
m_{II}	=	Masse des Bodenstücks hinter II-II,
W_W	=	Widerstandsmoment der Wange bei I-I,
0,67	=	Erfahrungswert, der die Stützwirkung des Steges berücksichtigt,

ergibt sich die Kraft für die ladungsraumseitige Keilfläche

$$P_1 = p_{max} \frac{\pi}{4} D_L^2 . \qquad (9)$$

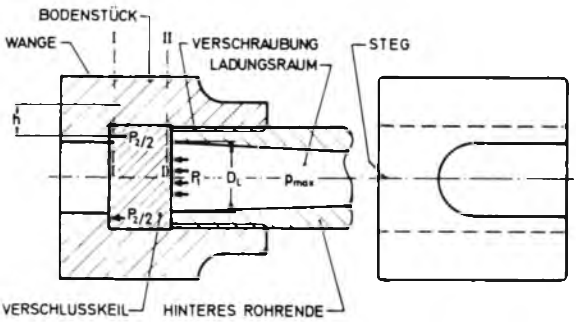


Bild 874. *Beanspruchung eines Keilverschlusses.*

Die Kraft auf beide Keilauflageleisten zusammen beträgt

$$P_2 = p_{max} \left(\frac{\pi}{4} D_L^2 - \frac{m_K}{m_R} 0{,}805\, D^2\right). \qquad (10)$$

Im Querschnitt I-I treten hohe Biegespannungen, überlagert von Zugspannungen auf, deren genauer Wert infolge des Steges und der Schwächung durch Nuten und Bohrungen mit einfachen Beziehungen nur überschläglich zu ermitteln ist (der Einfluß der Kerbwirkung ist dabei nicht berücksichtigt):

$$\sigma_{I\text{-}I,max} \approx \left(\frac{P_3}{2F_W} + \frac{P_2 \cdot h}{2W_W}\right) 0{,}67 \tag{11}$$

mit $$P_3 = P_2 - 0{,}805\, p_{max} \frac{m_I}{m_R} D^2 . \tag{12}$$

Eine entsprechende Berechnung ist für den Querschnitt II-II zu wiederholen:

$$\sigma_{II\text{-}II,max} \approx \left(\frac{P_4}{2F_W} + \frac{P_2 \cdot h}{2W_W}\right) 0{,}67 \tag{13}$$

mit $$P_4 = P_2 - 0{,}805\, p_{max} \frac{m_{II}}{m_R} D^2 . \tag{14}$$

Die höchsten Spannungen treten erfahrungsgemäß in den Ecken in der Nähe der Keilauflageleisten auf. Hier erreichen die Zugspannungen infolge Kerbwirkung mehr als das 2fache der Spannungen der Wangeninnenoberflächen.

Eine genaue Bodenstückberechnung ist mit Hilfe der Methode der finiten Elemente möglich. Durch sie können nicht nur die globalen Spannungen des vielfach statisch unbestimmten Bodenstücks genauer ermittelt werden, sondern auch die Kerbspannungen verschiedener zur Auswahl stehender Kerbformen.

Besonders hoch beansprucht sind die Keillochecken der Bodenstücke von Keilverschlüssen. Durch die Spannungsermittlung im Feinbereich gelingt es schrittweise, die Kontur der Ecken so zu gestalten, daß einerseits längs der Abrundung ein gleich hohes Vergleichsspannungsniveau eingehalten wird und daß andererseits dieses Niveau im Rahmen der konstruktiven und fertigungstechnischen Möglichkeiten zu einem Minimum wird.

Zur Kontrolle der Rechenergebnisse stehen die spannungsoptische Untersuchung von Kunststoffmodellen und die Messung mittels Dehnmeßstreifen beim Schuß zur Verfügung.

8.1.7. Lebensdauer der Geschützrohre

8.1.7.1. Verschleißlebensdauer

Man unterscheidet zwischen *Rohrverschleiß* infolge der abschmirgelnden Wirkung der Geschosse, insbesondere ihrer Führungsbänder, und

der *Rohrerosion* infolge der auswaschenden Wirkung der heißen, schnell strömenden Pulvergase bzw. infolge chemischer Prozesse zwischen Rohrwand und Pulvergasen.

Der Beginn der Züge ist von Rohrverschleiß und Rohrerosion am härtesten betroffen. Mit zunehmender Schußbelastung können ganze Felder ausreißen. Außerdem tritt eine Kalibererweiterung ein.

Hierdurch kann die Lebensdauer des Rohres maßgeblich bestimmt werden. Sie ist definiert als diejenige Schußbelastung, von der ab wegen des Verschleißzustandes nicht mehr alle militärischen Forderungen an die Waffe erfüllt werden. Diese Forderungen sind

ausreichende Treffwahrscheinlichkeit,

Mündungsgeschwindigkeit v_0 des Geschosses innerhalb bestimmter Toleranzen,

keine Geschoßpendler oder gar Querschläger,

ausreichender Drall (damit Zünder scharf werden) und

ausreichende Kadenz bei automatischen Waffen.

Rohrverschleiß und Rohrerosion hängen sehr stark von der Geschoßart, Geschoßanfangsgeschwindigkeit, Ladung sowie Rohrwandtemperatur ab. Letztere ergibt sich an der gefährdeten Rohrinnenwand als Summe der ausgeglichenen Temperatur zwischen den Schüssen und der nur im Millisekundenzeitbereich auftretenden Temperaturerhöhung während des Schusses. Von der Oberfläche aus in die Rohrwand hinein nimmt diese durch die Summe gekennzeichnete Temperaturspitze zwar schnell ab, sie kann jedoch bei unzureichender Wirkung der Wärmeisolation durch Beschichtung mit hochwarmfesten Werkstoffen an der Grenze zum Grundwerkstoff noch so hoch sein, daß eine Gefügeumwandlung eintritt; diese kann infolge der damit verbundenen Werkstoffversprödung zur Zerrüttung des Grundwerkstoffes führen, so daß die Beschichtung samt Partikeln des Grundwerkstoffs ausreißt. Dieser Vorgang wird durch die große tangentiale Dehnung der Rohrinnenwand und eventuelle Wasserstoffversprödung noch begünstigt.

Die genannten und gegebenenfalls weitere hier nicht geschilderte Einflüsse erfordern bei der Angabe der Verschleißlebensdauer eines Rohres eine genaue Beschreibung der Beschußbedingungen: Munitionsart, Beschußprogramm, Anfangsbedingungen und Umgebungsbedingungen für die Rohrtemperatur.

Beim Schießen mit verschiedenen Munitionsarten oder Ladungen werden durch Versuche die sogenannten EFC-Faktoren (EFC = Equivalent full charge) zur Beschreibung der Verschleißträchtigkeit der einzelnen Munitionsarten in bezug auf die Munitionsart mit der größten Verschleißwirkung ermittelt.

Mit Hilfe von chemisch oder physikalisch wirkenden Additiven als Beimischung zum Treibladungspulver läßt sich der Rohrverschleiß bzw. die Rohrerosion erheblich herabsetzen. Außerdem sollte das Produkt κMT_{ex}, das näherungsweise den mittleren Impuls eines Gasmoleküls darstellt (κ = Adiabatenkoeffizient, M = mittleres Molekulargewicht, T_{ex} = Explosionstemperatur der Pulvergase), möglichst klein sein. Es soll auch kein Sauerstoffüberschuß im Rohr bestehen.

Ein wirksames Mittel, den Rohrverschleiß herabzusetzen, ist das Hartverchromen der Rohrinnenoberfläche.

Große Aufmerksamkeit ist auch dem Führungsbandwerkstoff zu widmen. Einerseits soll das Führungsband weicher sein als der Rohrwerkstoff, andererseits soll es nicht zum Schmieren neigen.

Sorgfältige Reinigung der Rohre nach dem Schießen ist wegen der chemisch aggressiven Pulverrückstände besonders wichtig.

8.1.7.2. Ermüdungslebensdauer

Rohre und Bodenstücke haben nur eine bestimmte Ermüdungslebensdauer, die durch folgende Parameter begrenzt wird:

- hohes Spannungsniveau im Rohr und im Bodenstück,
- hoher Spannungsausschlag,
- Kerbwirkung, insbesondere bei Bodenstücken,
- Wärmerisse an der Rohrinnenwand,
- interkristalline Korrosion (Spannungskorrosion),
- Sprödbruchempfindlichkeit,
- niedrige Temperaturen,
- Fehler bei der Werkstoffzusammensetzung und Wärmebehandlung sowie Rohrerosion und Verschleiß.

Während sich das Spannungsniveau in Rohren im Grundwerkstoff durch das Einbringen von Druckeigenspannungen an der Rohrinnenwand mittels Autofrettage erheblich senken läßt, ist der hohe Spannungsausschlag bei gegebenem Werkstoff nicht zu vermeiden. Verschleißfeste Beschichtungen haben im allgemeinen durch ihren gegenüber dem Grundwerkstoff höheren E-Modul noch höhere Spannungsausschläge zu ertragen, als es beim unbeschichteten Grundwerkstoff der Fall wäre. Der Grundwerkstoff bestimmt nämlich den Dehnungsausschlag.

Abmessungen und Gewichte setzen den Bemühungen um geringere Spannungen eine enge Grenze. Bei der Gestaltung günstiger Kerben an unvermeidlichen Ecken und Nuten wird der Konstrukteur mathemati-

sche Berechnungen, Spannungsoptik an Kunststoffmodellkörpern und Dehnmeßstreifenmeßtechnik beim Beschuß an Prototypgeräten einsetzen. An hochbeanspruchten Stellen im Bodenstück und im Verschlußkeil wird das Spannungsniveau gegebenenfalls durch ein gewolltes Überschreiten der $\sigma_{0,2}$-Grenze während des Überdruckbeschusses durch die dabei entstehenden örtlichen Druckeigenspannungen vielfach entscheidend gesenkt.

Gegen Wärmerisse an der Rohrinnenwand kann man im allgemeinen wenig unternehmen. Hier helfen gegebenenfalls ein wenig Additive und Pulver mit niedrigerer Verbrennungstemperatur.

Besondere Beachtung verdient die Sprödbruchempfindlichkeit der verwendeten Stähle. Ein Maß für die Güte eines Werkstoffs in bezug auf eine gute Zähigkeit (entsprechend einer geringen Neigung zum Sprödbruch) bei hoher Festigkeit ist der sogenannte K_{Ic}-Wert.

Bei Kenntnis des K_{Ic}-Wertes, der Streckgrenze und der Beanspruchung läßt sich voraussagen, von welcher Tiefe an ein Anriß zum plötzlichen Versagen des Rohres führt. Bei Kenntnis bestimmter Werkstoffparameter läßt sich die Rißfortschrittsgeschwindigkeit ermitteln, aus der man auf die Schußzahl schließen kann, die ein Riß braucht, um die kritische Rißtiefe zu erreichen.

Der K_{Ic}-Wert nimmt mit tiefer werdenden Temperaturen ab. Nach neueren Erfahrungen werden Rohrstähle zum uneingeschränkten Gebrauch nur zugelassen, wenn der K_{Ic}-Wert bei $-20°C$ größer als 3430 $Nmm^{-3/2}$ ist.

Zuverlässige Aussagen über die Ermüdungslebensdauer sind entweder mit Simulatorversuchen an Proben, besser an kompletten Bodenstücken bzw. Rohrabschnitten und/oder durch Lebensdauerbeschüsse zu erlangen.

Zum Nachweis der Ermüdungslebensdauer bei Rohren großkalibriger Geschütze hat sich ein kombiniertes Verfahren aus Lebensdauerbeschuß und hydrostatischer Simulation bewährt, bei Verschlüssen die Simulation der dynamischen Belastung auf einem Schlagwerk.

8.1.8. Geschützrohrwerkstoffe und deren Prüfung

8.1.8.1. Werkstoffe

Für moderne Geschützrohre und Bodenstücke werden Vergütungsstähle eingesetzt. Ihre Streckgrenze bzw. $\sigma_{0,2}$-Grenze liegt zwischen 750 und 1200 N/mm^2. Ob eines Tages martensitaushärtende Stähle mit Streckgrenzen über 1600 N/mm^2 eingesetzt werden können, ist im Hinblick auf die Bruchzähigkeit und den Preis zur Zeit noch fraglich. Aussich-

ten hat die Verwendung von Rohren mit verschleißfester Innenoberfläche in Form einer inneren Lage spröderen Werkstoffs und tragender, zäher äußerer Lage, wobei diese Zweistoffverbindung bereits bei der Rohteilherstellung entsteht.

Als Rohrstähle kommen Stähle in Betracht, die etwa vergleichbar sind mit dem Stahl 30 Ni Cr Mo 16 (z.B. Röchling Monix 3 W), der folgende Eigenschaften hat:

Chemische Zusammensetzung:

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,30	0,25	0,40	1,35	4,0	0,50

Festigkeitskennwerte:

σ_S bzw. $\sigma_{0,2}$	σ_B	δ_5	ψ	a_K	K_{Ic}
mind. 980	1180 ... 1340	9	45	mind. 34 bei – 40° C	mind. 3430 bei – 20° C

Darin ist σ_S	= Streckgrenze	in N/mm²	aus dem Zugversuch
$\sigma_{0,2}$	= 0,2-Grenze	in N/mm²	
σ_B	= Zugfestigkeit	in N/mm²	
δ_5	= Bruchdehnung	in %	
ψ	= Brucheinschnürung	in %	
a_K	= Kerbschlagzähigkeit	(ISO-V-Probe) in J	aus dem Kerbschlagbiegeversuch
K_{Ic}	= kritischer Spannungsintensitätsfaktor	in Nmm $^{-3/2}$	z. B. aus dem Kerbschlagbiegeversuch

8.1.8.2. Werkstoffprüfung

Geschützrohrwerkstoffe und Halbzeuge werden nach erzeugungsgebundenen Liefervorschriften des Auftraggebers einer sorgfältigen und umfassenden Prüfung unterzogen. Das Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung verlangt die Werkstoffprüfung nach TL (Technische Lieferbedingungen), deren Inhalt die Anwendung einer Reihe von Prüfverfahren besonderer Art oder entsprechend DIN-Normen vorschreibt, darüber hinaus die Art der Protokollführung.

Zur Erleichterung der Kontrolle und zur Einschränkung des Aufwandes werden besondere Vorschriften bezüglich Schmelzchargen, Vergütungschargen und Bearbeitungschargen erlassen.

Es werden folgende Prüfungen durchgeführt:

1. Chemische Analyse, qualitativ und quantitativ
2. Physikalische Prüfungen

   Zugversuch nach DIN 50125 } an Proben quer zur Faserrichtung

   Kerbschlagbiegeversuch nach DIN 50115 } an Proben quer zur Faserrichtung

   Härteprüfung der Rohrrohteiloberfläche am Boden, in der Mitte und an der Mündung

   gegebenenfalls K_{Ic}-Versuche an Proben quer zur Faserrichtung

3. Gefügeuntersuchungen
4. Prüfung auf Rißfreiheit nach dem Ultraschall-, Magnetpulver- und Ausleuchteverfahren.

Erläuterungen zum K_{Ic}-Biegeversuch [3]

Hierzu werden rechteckige Platten mit bestimmten Mindestabmessungen von einer Längsseite her eingekerbt. Im Kerbgrund wird mit Hilfe eines Pulsators ein Anriß eingeschwungen. Die so vorbereitete Probe wird auf Biegung belastet, bis sich der Anriß erweitert, wobei die Rißaufweitung über der Last graphisch aufgetragen wird. Bei einer bestimmten Last bricht die Probe dynamisch. Nach dem Versuch wird die eingeschwungene Rißtiefe auf der Probe gemessen. Die dynamische Rißfläche hebt sich deutlich von der eingeschwungenen ab. Aus Rißtiefe und Last bei Einsetzen der dynamischen Rißerweiterung erhält man den K_{Ic}-Wert.

Anhand des Last-Rißaufweitungs-Diagramms kann auf die Zulässigkeit des Versuchs (Vermeidung einer unzulässigen plastischen Verformung im Rißgrund) geschlossen werden. An der Rißspitze der Probe muß nämlich ein ebener Dehnungszustand vorhanden sein.

Neuerdings werden auch andere Verfahren zur Bestimmung des K_{Ic}-Wertes herangezogen, z. B. Versuche an C-Proben.

8.2. Lafetten

In den folgenden Abschnitten werden die Hauptfunktionen der Lafetten herausgestellt und die Baugruppen, die zur Erfüllung dieser Aufgaben erforderlich sind, behandelt.

8.2.1. Lagerung der Geschützrohre und Aufnahme der Kräfte beim Schuß

Die Lagerung der Geschützrohre und die Aufnahme der Rückstoß- und Drallkräfte beim Schuß erfolgt bei Rohrrücklaufgeschützen durch die Baugruppen Rohrwiege, Rohrbremse und Rohrvorholer, die zusammen mit dem Geschützrohr die sogenannte *höhenrichtbare Masse* bilden.

Entsprechend der in Abschnitt 8.2.2.1 dargestellten Systematik für die dort auch definierten Geschützteile, die sich um die Höhenricht-, Seitenricht- und Verkantungsachse drehen, wird für die höhenrichtbare Masse in diesem Abschnitt die Bezeichnung *Geschützhöhenrichtteil* oder auch Kanonenhöhenrichtteil, abgekürzt: Höhenrichtteil oder GHT, verwendet.

8.2.1.1. Kräfte und Kräfteverlauf beim Schuß
(siehe auch Kapitel 9)

Gasrückstoßkraft

Beim Schuß entsteht im Verbrennungsraum des Geschützrohres ein hoher Gasdruck (bis über 7000 bar), welcher auf den Boden des Geschosses wirkt und dieses nach vorne beschleunigt.

Der gleiche Gasdruck wirkt auch auf den Verschluß des Geschützrohres, so daß dieses mit einer *Gasrückstoßkraft* nach hinten belastet wird, die die gleiche Größe hat, wie die Geschoßbeschleunigungskraft (Aktion = Reaktion).

Diese große Gasrückstoßkraft auf das Geschützrohr wirkt auf die Rohrwiege eines Rohrrücklaufgeschützes nicht unmittelbar. Die Lagerung des Geschützrohres in der Rohrwiege ist so eingerichtet, daß das Geschützrohr nach hinten gleiten kann. Beim Schuß beschleunigt die Gasrückstoßkraft das Geschützrohr (besser: den Geschützrücklaufteil, Abschn. 8.1) während des Durchlaufs des Geschosses durch das Rohr kurzzeitig nach hinten, ohne die Rohrwiege dabei zu belasten.

Der Beschleunigungsimpuls, den der Rücklaufteil durch die Gasrückstoßkraft erhält, verringert sich bei Vorhandensein einer Mündungsbremse (s. Abschn. 8.1.3, 9.7, 9.8).

Bremskraft

Das durch die Gasrückstoßkraft nach hinten beschleunigte Geschützrohr wird bis zum Stillstand abgebremst durch verschiedene Teilbremskräfte. Diese sind die Flüssigkeitsbremskraft der Rohrbremse, die Kraft des Vorholers sowie Reibungskräfte an der Geschützrohrlagerung und den Kolbenstangen der Rohrbremse und des Rohrvorholers.

Diese Teilbremskräfte wirken auf den Geschützrücklaufteil nach vorne, den Rücklauf bremsend.

Die Summe der Teilbremskräfte bildet die Gesamt-Bremskraft, auch kurz Bremskraft genannt.

Bremsrückstoßkraft

Das Abbremsen der Rücklaufmasse erzeugt eine Massenträgheitskraft, die der Größe nach gleich der Gesamtbremskraft ist und die als

Bremsrückstoßkraft auf das Geschütz nach hinten wirkt. Ihre Wirkungslinie geht durch den Schwerpunkt des Geschützrücklaufteils, unabhängig davon, an welcher Stelle die einzelnen Teilbremskräfte angreifen.

Der Begriff „Bremsrückstoßkraft" wurde hier eingeführt, weil dadurch zum Ausdruck gebracht wird, daß es eine Kraft ist, die das Geschütz nach hinten stößt, während die meist angeführte „Bremskraft" eine Kraft ist, die nach vorne auf den Geschützrücklaufteil wirkt.

Außerdem unterscheidet er die Rückstoßkraft, die durch das Bremsen der Rücklaufteile entsteht und das Geschütz *belastet,* von der Rückstoßkraft, die durch den Gasdruck erzeugt wird und das Rohrrücklaufgeschütz unmittelbar *nicht belastet.*

Die auf das Geschütz wirkende Bremsrückstoßkraft wird um so kleiner,

je länger der Rücklaufweg,
je konstanter die Gesamtbremskraft über dem Rücklaufweg,
je größer das Gewicht des Geschützrücklaufteiles und
je größer der Wirkungswert der Mündungsbremse (Abschn. 8.1.3)
ist.

Die konstante Gesamtbremskraft wird durch eine hydraulische Regulierung der Flüssigkeitsbremskraft der Rohrbremse in Abhängigkeit vom Rücklaufweg erreicht (Abschn. 9.11, 9.12 und 8.2.1.4).

Bei Geschützen mit großem Erhöhungsbereich wird die Flüssigkeitsbremskraft außerdem auch noch in Abhängigkeit von der Rohrerhöhung reguliert, um bei großer Erhöhung kleinere Rücklauflängen zu erhalten.

Um die Bedeutung der Rohrrücklaufgeschütze, die von Rheinmetall in den Jahren von 1895 bis 1900 entwickelt wurden, zu ermessen, sollen folgende Zahlenbeispiele moderner Geschütze zeigen, welche außerordentlichen Fortschritte im Hinblick auf Reduzierung der Rückstoßkräfte erzielt wurden.

Die auf Bild 812 gezeigte KPz-Bordkanone hat eine Gasrückstoßkraft von 7650 kN. Sie würde bei einem vollkommen starr gelagerten Rohr als Rückstoßkraft auf den KPz wirken.

Durch den relativ geringen Rücklauf von 340 mm sinkt die Bremsrückstoßkraft auf 480 kN, d. h. auf etwa 6 % der Rückstoßkraft bei starr gelagertem Rohr.

Das Feldgeschütz Bild 819 hat außer der Rohrrücklaufbremse auch noch eine Zweikammer-Mündungsbremse (s. Abschn. 8.1.3).

In diesem Fall verringert sich die Gasrückstoßkraft in Höhe von 7780 kN auf eine Bremsrückstoßkraft von 252 kN. Die auf das Geschütz wirken-

de Rückstoßkraft ist demnach nur noch 3,2% der Rückstoßkraft bei vollkommen starr gelagertem Rohr.

Vorholerkraft

Nach beendetem Rücklauf bringt der Rohrvorholer das Geschützrohr wieder in seine Ausgangslage (Schußlage) zurück.

Die dazu erforderliche Kraft wird durch mechanische Federn oder Gasfedern, die über ihre Vorspannung hinaus beim Rücklauf des Rohres noch mehr gespannt werden, aufgebracht.

Damit das Geschütz am Ende des Vorlaufs keinen Stoß nach vorne erhält, wird der Geschützrücklaufteil am Ende des Vorlaufs mit Hilfe der Rohrbremse hydraulisch abgebremst.

Drallmoment

Als Reaktion auf das dem Geschoß beim Schuß übertragene Drehmoment zur Erzeugung des Dralles für die Stabilisierung des Geschosses beim Flug wirkt in entgegengesetzter Richtung ein Drehmoment auf das Geschützrohr, Drallmoment genannt.

Dieses Drallmoment wird von dem Geschützrohr über die Rohrlagerung auf die Wiege übertragen, die es über die Schildzapfen an die Oberlafette oder das Turmgehäuse weitergibt.

8.2.1.2. Richtlinien zur Vermeidung zusätzlicher, schädlicher Kräfte und Drehmomente

Die vorstehend behandelten, von außen *auf den Geschützhöhenrichtteil* wirkenden Kräfte, nämlich Gasrückstoßkraft, Bremsrückstoßkraft und dazu noch die Fahrstöße können schädliche Momente um die Schildzapfenachse und Seitenrichtachse sowie Schwingungen innerhalb des Geschützrohres und in der Lafette erzeugen, die das Geschütz, vor allem die Richtmaschinen, zusätzlich beanspruchen und außerdem die Treffgenauigkeit herabsetzen.

Um dies zu vermeiden, sollten die Geschütze nach folgenden Richtlinien entworfen werden, wenn keine wichtigen Umstände dagegen sprechen:

Der Schwerpunkt des Geschützrücklaufteiles soll in der Wirkungslinie der Gasrückstoßkraft, d.h. in der Seelenachse des Rohres liegen.

Die Wirkungslinie der Bremsrückstoßkraft, die durch den Schwerpunkt des Geschützrücklaufteils verläuft, soll durch die Schildzapfenachse gehen.

Der Schwerpunkt des Geschützhöhenrichtteiles soll in der Schildzapfenachse liegen, zumindest soll er sich in Fahrstellung (bei ungezurrtem Rohr) in der Senkrechten durch den Schildzapfen befinden, so daß bei

Fahrstößen kein Drehmoment um die Schildzapfenachse entsteht. Diese Anordnung ist bei Pz-Bordkanonen zu erreichen, bei stabilisiertem Kanonenhöhenrichtteil muß sie gefordert werden. Auch die Schiffs- und Küstengeschütze haben meistens diese Anordnung. Bei den Feld- und Flugabwehrgeschützen mit großem Erhöhungsbereich ist sie selten zu erreichen (Bilder 815, 816, 817, 819, 821, 822, 827, 829).

Die Seelenachse des Rohres und der Schwerpunkt des Geschützrücklaufteiles sollen in der Ebene, die durch die Seitenrichtachse geht, liegen.

Auch die folgenden *im* Geschützhöhenrichtteil wirkenden Kräfte, die Flüssigkeitsbremskraft, die Vorholerkraft und Kräfte an den Geschützrohrlagerstellen, können beim Schuß Schwingungen auslösen, die das Erreichen eines möglichst kleinen und vor allem konstanten Abgangsfehlerwinkels besonders bei verschiedenen Munitionsarten erschweren.

Um dies zu vermeiden, sind noch folgende Richtlinien zu beachten:

Die Wirkungslinie der Resultierenden aus den Flüssigkeitsbremskräften mehrerer Rohrbremsen soll durch den Schwerpunkt des Geschützrücklaufteiles gehen.

Die Wirkungslinie der Resultierenden aus den Vorholerkräften soll nicht durch diesen Schwerpunkt gehen, so daß die ständig und stoßfrei wirkende Vorholerkraft dem Geschützrohr eine bestimmte und definierte Lage innerhalb der Lagerung gibt und erhält.

Falls nur eine Rohrbremse vorhanden ist, deren Wirkungslinie nicht durch den Schwerpunkt des Geschützrücklaufteiles gehen kann, sollten die Wirkungslinien der Rohrbremse und des Vorholers möglichst nahe beisammenliegen und möglichst wenig Abstand vom Schwerpunkt des Geschützrücklaufteiles haben.

8.2.1.3. **Rohrwiegen**

Die Rohrwiege bildet die Tragkonstruktion für den Geschützhöhenrichtteil. Sie nimmt die Gewichtskräfte dieses Geschützteils auf sowie die Kräfte und Drehmomente, die beim Schuß entstehen, und gibt sie über die Schildzapfen und Richtmaschine an die Oberlafette, den Geschützturm oder, bei dreiachsigen Geschützen, an den Verkantungsträger weiter (Bilder 883, 884, 886 sowie 885, Punkt 3, und 814, Punkt 6 und 7).

Es kommen in der Hauptsache drei Arten von Rohrwiegen in Betracht: die Trogwiege, die Jackenwiege und die Turmwiege.

Die *Trogwiege* hat an einem geschweißten oder genieteten Träger, der vorne kastenförmig geschlossen und hinten U-förmig offen ist (Wiegentrog), zwei Gleitschienen, auf denen an dem Geschützrohr angebrachte Rohrklauen bzw. -schienen ruhen bzw. beim Schuß zurückgleiten.

An dem Wiegentrog ist der Wiegenträger einschließlich der beiden Schildzapfen befestigt (Bild 827).

Vorteile der Trogwiege:

Die Aufnahme der Drallkräfte beim Schuß und die Sicherung des Rohres gegen Drehen um die Seelenachse ist ohne besonderen Aufwand durch die Rohrklauen gegeben.

Das Spiel zwischen den Gleitschienen und den Rohrklauen kann klein gehalten werden, weil die Höhe der Schienen klein ist und keine Rücksicht auf die stark schwankenden Temperaturen des Rohres zu nehmen ist.

Das Geschützrohr zeigt keine blanken Laufflächen.

Die Schildzapfen für die Höhenrichtbewegung der Rohrwiege können auf der ganzen Länge des Wiegentroges leicht angebracht werden, also auch hinter dem Geschützrohr. Dadurch sind auch bei Geschützen mit einem großen Höhenrichtbereich kleine Feuerhöhen möglich (Bild 827).

Für die Ausgleicher (Abschn. 8.2.2.3) lassen sich an dem langen Wiegentrog leicht Anlenkungspunkte finden (Bilder 819, 820, 822).

Im Wiegentrog können Rohrbremsen und Rohrvorholer raumsparend und geschützt untergebracht werden.

Am hinteren Teil des Wiegentroges lassen sich unter anderem Teile einer Ladeeinrichtung, Anschläge zur Betätigung der Verschlußmechanik, Rücklaufmesser sowie Abweiser zum Schutz der Bedienung vor dem zurücklaufenden Rohr anbringen (Bilder 819, 820, 827, 829, 830).

Die *Jackenwiege* besteht in der Hauptsache aus einem rohrartigen Guß- oder Schweißteil (Wiegenrohr), in das das Rohr eingelagert ist. Außen ist eine Anbringungsmöglichkeit für Schildzapfenträger, Wiegenwalze, Panzerblende, Lagerung für die Rohrbremsen und Rohrvorholer sowie eine Nebenbewaffnung vorgesehen.

Das Geschützrohr ist auf einer Länge, die der Lagerlänge plus der Rücklauflänge entspricht, zylindrisch bearbeitet und ruht bzw. gleitet mit dieser zylindrischen Fläche in der Bohrung des Wiegenrohres.

Vorteile der Jackenwiege:

Die Jackenwiege kann sehr kompakt gebaut werden und eignet sich besonders für Bordgeschütze mit Turm- oder Kasemattlafetten.

Bei einer Jackenwiege können die außen glatten, zylindrischen Rohre leicht ausgewechselt werden.

Der Raum hinter dem Geschützrohr kann freigehalten werden von Teilen der Rohrwiege.

Im allgemeinen hat die Jackenwiege einen geringeren Fertigungsaufwand als die Trogwiege.

Zur *Turmwiege:* In Bild 810 ist der KPz AMX 50 und in Bild 814 ein dreiachsig stabilisierter KPz dargestellt. Man erkennt, daß die tragende Konstruktion des Geschützhöhenrichtteiles durch das Turmgehäuse gebildet wird. Das Turmgehäuse erfüllt neben den anderen Aufgaben als Teil des Turmes, geschützseitig gesehen, alle Funktionen der Rohrwiege und wird hier deshalb als dritte Wiegenart angesprochen und Turmwiege genannt.

Bei dem KPz AMX 50 lagert das Geschützrohr rücklaufbeweglich in einer Bohrung wie bei der Jackenwiege und bei dem dreiachsig stabilisierten Turm nach Bild 814 in Schienen wie bei der Trogwiege.

Die Schildzapfen befinden sich am Turmgehäuse und drehen sich beim Höhenrichten in den Lagern der Oberlafette (Bild 810) oder in einem Verkantungsträger (Bild 814).

Vorteile der Turmwiege:

Es findet innerhalb des Turmes keine Höhenrichtbewegung des Rohres statt, was für die Raumausnutzung und insbesondere für eine Ladeeinrichtung günstig ist.

Die Turmhöhe über Mitte Rohr ist klein.

Bei einer Stabilisierung des Geschützhöhenrichtteiles ist der gesamte Turm einschließlich Besatzung, Feuerleitung, Beobachtungsgeräten usw. stabilisiert.

Es lassen sich leicht die Schwerpunkte des Höhen- und Seitenrichtteiles in die Höhen- und Seitenrichtachse legen, wodurch das Richten und Stabilisieren begünstigt wird.

Nachteilig ist der kleine Höhenrichtbereich.

8.2.1.4. Rohrbremsen und Rohrvorholer

Die Funktionen und Anordnungen der Rohrbremsen und Vorholer innerhalb der Geschütze sowie deren Berechnung werden in den Abschnitten 8.2.1 und in Kap. 9 behandelt.

In diesem Abschnitt sollen einige typische Ausführungsbeispiele von Rohrbremsen und Vorholern dargestellt werden.

Rohrbremsen

In der Rohrbremse nach Bild 875 erfolgt die Drosselung des Bremsflüssigkeitsstromes mit Hilfe einer Regelstange 1 von unterschiedlichem Durchmesser, über die die hohle Kolbenstange mit Kolben 2 gleitet. Der mit dem Rücklauf veränderliche Drosselquerschnitt wird dabei aus dem Ringspalt 3 zwischen Kolbenbohrung und Regelstange gebildet. Die Vorlaufhemmung mit dem Vorlaufhemmdorn 4 findet im rückwärtigen Teil der hohlen Kolbenstange statt.

Einige Rohrbremsen, insbesondere Bremsen von Schnellfeuergeschützen, haben eine im Bremszylinder (Bild 875) oder getrennt davon angeordnete Wärmeausgleichkammer (Bild 876), in welche die erwärmte und dadurch ein größeres Volumen besitzende Bremsflüssigkeit ausweichen kann; andernfalls würde bei starker Erwärmung das vollständige Einschieben der Kolbenstange behindert, so daß das Rohr nicht vollständig in Schußstellung vorläuft. Bei der Rohrbremse in Bild 875 wird die Wärmeausgleichkammer 5 durch eine feste Zwischenwand im Bremszylinder und einen gegen Federn verschieblichen Kolben gebildet.

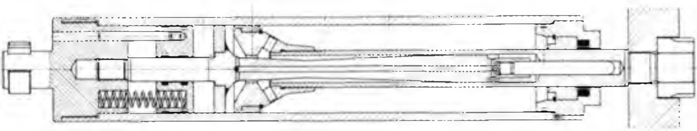


Bild 875. *Rohrbremse mit Wärmeausgleichkammer.*

Die Arbeitsweise des getrennt angeordneten Wärmeausgleichbehälters nach Bild 876 ist dem Bild und der Legende zu entnehmen.

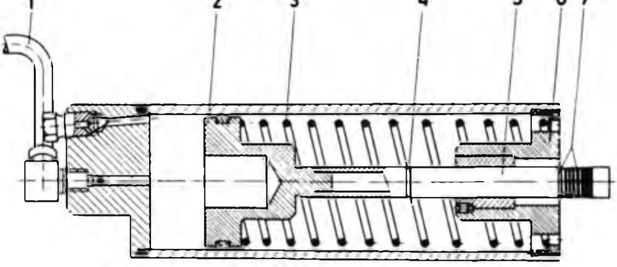


Bild 876. *Wärmeausgleichbehälter;*
1 Ölleitung zur Rohrbremse, 2 Ausgleichkolben, 3 Ausgleichfeder, 4 Rille (Feuerpause), 5 Kontrollstange, 6 hinterer Zylinderkopf, 7 Rille mit Riffelung.

Rohrbremsen mit Rücklaufverstellung werden bei Geschützen mit großem Höhenrichtbereich (Panzer-, Feldhaubitzen und Flugabwehrkanonen) benötigt, um bei gegebener Feuerhöhe auch bei großen Erhöhungen die notwendige Bodenfreiheit beim Rücklauf zu gewährleisten. Die Rücklaufverstellung (Rücklaufverkürzung) erfolgt bei der in Bild 877 dargestellten Rohrbremse (mit Vorlaufhemmung) selbsttätig mit der Rohrerhöhung über ein Verstellgetriebe 1 durch Drehen der Regelstange 2 innerhalb der hohlen Kolbenstange 3; dadurch werden vier in die Regelstange eingearbeitete Züge 4 gegenüber vier Durch-

strömöffnungen 5 im Kolben verstellt (mehr oder weniger abgedeckt) und so ein Teil des Gesamtdrosselquerschnittes verändert.

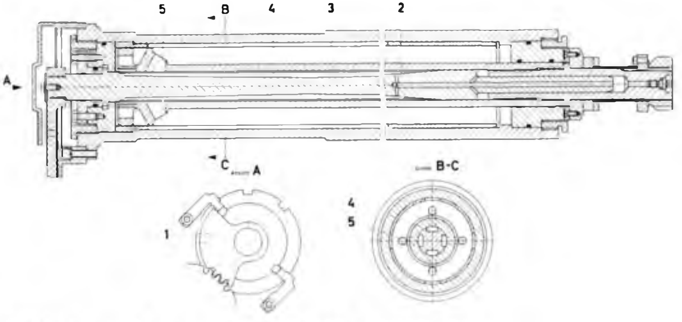


Bild 877. *Rohrbremse mit Rücklaufverstellung.*

Rohrvorholer

Bei den Rohrvorholern sind zu unterscheiden:

Feder-Rohrvorholer,
hydropneumatische Rohrvorholer,
pneumatische Rohrvorholer.

Ursprünglich waren die Vorholer im allgemeinen *Feder-Rohrvorholer*. Heute werden diese kaum noch verwandt, es sei denn in Spezialfällen, z.B. bei Kombinationen Rohrbremse/Rohrvorholer (Bild 881, 882).

Statt der Feder-Rohrvorholer verwendete man dann zunächst *hydropneumatische Vorholer* (Bild 878).

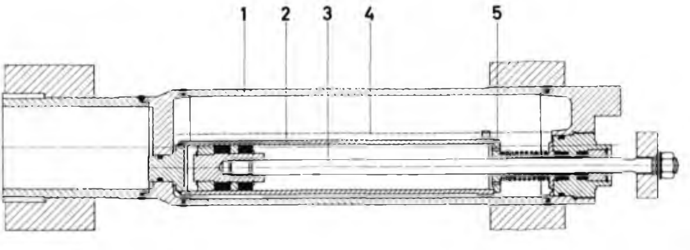


Bild 878. *Hydropneumatischer Rohrvorholer;*
1 Vorholzylinder, 2 Verdrängerzylinder, 3 Kolbenstange mit Kolben, 4 Bremsölspiegel, 5 Ventil.

Diese haben einen Vorholzylinder mit unter Druck stehendem Gas und einen Verdrängerzylinder mit Bremsflüssigkeit, die den Druck des Gases auf einen Kolben mit Kolbenstange überträgt und eine gute Abdichtung des Kolbens und der Kolbenstange ergibt. Letztere ist mit dem Rohr verbunden, läuft mit diesem zurück und holt das Rohr nach dem Rücklauf wieder vor.

Diese an sich gut bewährte, aber räumlich aufwendige Konstruktion ist durch den *rein pneumatischen Vorholer* (Bild 879) abgelöst worden. Er ist nur mit vorgespanntem Stickstoff gefüllt, der beim Rohrrücklauf weiter komprimiert wird und sich beim Vorlauf wieder auf den Ausgangsdruck entspannt. Die Abdichtung besorgen zwei von außen nachfüllbare Fettkammern im Kolben und am Austritt der Kolbenstange aus dem Vorholer.

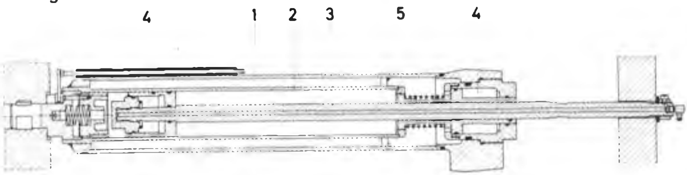


Bild 879. *Pneumatischer Rohrvorholer;*
1 Vorholzylinder, 2 Verdrängerzylinder, 3 Kolbenstange mit Kolben, 4 Fettkammern, 5 Ventil.

Ein Vorholer neuester Konstruktion, der einige Dichtungsprobleme der beiden vorgenannten Arten umgeht, ist in Bild 880 gezeigt. Er arbeitet wieder nach dem *hydropneumatischen Prinzip*, vermeidet jedoch eine direkte Berührung von Flüssigkeit und Gas, wodurch das zuweilen auftretende, unerwünschte Aufschäumen des Hydrauliköles vermieden wird.

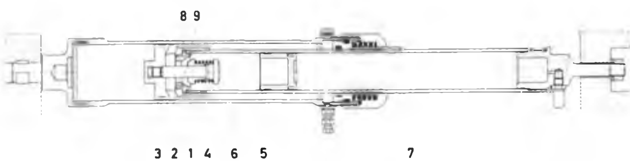


Bild 880. *Hydropneumatischer Rohrvorholer mit getrennten Flüssigkeits- und Gasräumen während des Rohrrücklaufs.*

Das im ringförmigen Ölraum 1 befindliche Hydrauliköl wird beim Rohrrücklauf durch die Öffnungen 2 des Kolbens 3 und das sich öffnende Rückschlagventil 4 gegen den (im Ruhezustand am Rückschlagventil anliegenden) fliegenden Kolben 5 und weiter in den vorderen Raum der hohlen Kolbenstange 6 gedrückt, wobei es den fliegenden Kolben vor sich herschiebt; dieser komprimiert dabei das im „Stickstoffraum" 7 der hohlen Kolbenstange befindliche Gas.

Beim Wiedervorlauf des Rohres entspannt sich der Stickstoff und treibt den fliegenden Kolben wieder auf das nunmehr geschlossene Rückschlagventil zu, wobei das Hydrauliköl durch kleine Öffnungen 8 und 9 im Kolben gedrosselt in den Ölraum 1 zurückgedrückt wird.

Kombinationen Rohrbremse/Rohrvorholer

In Bild 881 ist eine Rohrbremse dargestellt, bei der die Vorholfeder 1 zur Platzersparnis in den Bremszylinder 2 eingelegt ist. Der Drosselquerschnitt wird aus mehreren in die Zylinderwand eingearbeiteten, sich verjüngenden Bremszügen 3 gebildet. Um harte Anschläge am Ende des Vorlaufes zu vermeiden, ist die Bremse — wie übrigens alle modernen Rohrbremsen — mit einer Vorlaufhemmung ausgerüstet. Diese besteht aus einem Dorn 4 (Vorlaufhemmdorn), der zum Ende des Vorlaufes in eine Kammer des Kolbens eintritt und die darin angesammelte Bremsflüssigkeit durch einen Ringspalt wieder verdrängt.

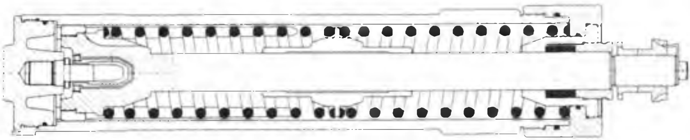


Bild 881. *Kombination Rohrbremse/Feder-Rohrvorholer.*

Eine weitere Kombination Rohrbremse/Rohrvorholer zeigt Bild 882. Hier sind Rohrbremse und Rohrvorholer konzentrisch um das Rohr angeordnet. Das Jackenwiegenrohr 2, in dem das Kanonenrohr gelagert ist, bildet gleichzeitig den Bremszylinder. Der am Bodenstück feste Bremskolben 4 ist als Rohr ausgebildet, er gleitet beim Rück- und Vorlauf über die Rohrlagerbuchse 3. Die Bremsung erfolgt dadurch, daß die im Bremszylinder befindliche Bremsflüssigkeit beim Rücklauf durch den Ringspalt zwischen dem Bremskolbenring 6 und der sich verengenden Innenwand des Bremszylinders 2 hindurchgepreßt wird, wobei die Vorholfeder 5 gespannt wird. Am Ende des Wiedervorlaufs unter der Spannkraft der Vorholfeder tritt der Bremskolbenring 6 in die Pufferkammer 7 ein, wodurch das Entweichen der Bremsflüssigkeit aus dieser Kammer zunehmend gedrosselt und die Vorlaufbewegung des Rohres entsprechend verlangsamt wird.

8.2.2. Richten, Stabilisieren und Horizontieren

Eine wichtige Aufgabe der Lafette besteht darin, die Richtung des Geschützrohres nach vorgegebenen Höhen- und Seitenrichtwerten einer Zieleinrichtung oder Feuerleitung einstellen zu können, und zwar mit der geforderten Beschleunigung, Geschwindigkeit, Gleichförmigkeit und Genauigkeit innerhalb bestimmter Höhen- und Seitenrichtbereiche.

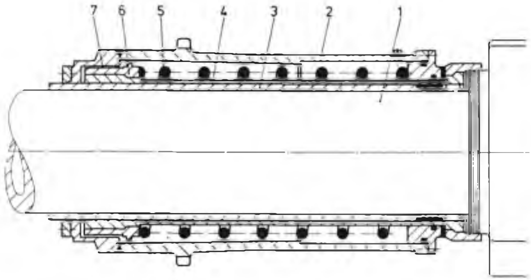


Bild 882. *Kombination Rohrbremse/Feder-Rohrvorholer konzentrisch zum Kanonenrohr (vereinfachte Darstellung);*
1 Kanonenrohr mit Bodenstück, 2 Jackenwiegenrohr (Bremszylinder), 3 Lagerbuchse für das Rohr, 4 Bremskolben, 5 Vorholfeder, 6 Bremskolbenring, 7 Pufferkammer.

Außerdem ist bei Panzern und Schiffen oft eine Stabilisierung gefordert, die bewirkt, daß das Geschützrohr die eingestellte Richtung im Raum beibehält, auch wenn das Fahrzeug irgendwelche Winkelbewegungen macht.

8.2.2.1. Richtachsen, Geschützhöhenrichtteil, -seitenrichtteil und -verkantungsteil

Die Lafetten haben für das Richten der Geschützrohre im allgemeinen zwei Richtachsen, die *Höhenrichtachse* (Schildzapfen-, Elevationsachse) und die *Seitenrichtachse* (Schwenk-, Azimutachse).

Manche Geschütze haben eine weitere Achse, und zwar zum Horizontalstellen der Höhenrichtachse, nämlich die *Verkantungsachse.*

Bei Lafettenberechnungen, Aufbau- oder Funktionsüberlegungen, Angaben für Schwerpunkte, Achsen oder Trägheitsmomente muß oft der Geschützteil, der sich um eine bestimmte Achse dreht, angesprochen werden. Eine kurze, allgemeinverständliche Bezeichnung durch *ein* Wort für diesen Geschützteil gibt es bisher nicht.

Es werden deshalb hier die nachfolgenden Bezeichnungen eingeführt und zum Teil mit ihren Abkürzungen verwendet.

Es handelt sich um die wie folgt bezeichneten und definierten Geschützteile:

Geschützhöhenrichtteil (oder Kanonenhöhenrichtteil)
abgekürzt: Höhenrichtteil oder GHT

Geschützseitenrichtteil (oder Kanonenseitenrichtteil)
abgekürzt: Seitenrichtteil oder GST

Geschützverkantungsteil (oder Kanonenverkantungsteil)
abgekürzt: Verkantungsteil oder GVT

Der Geschützhöhenrichtteil (GHT) (sogenannte höhenrichtbare Masse) dreht sich um die Höhenrichtachse (Schildzapfenachse, Elevationsachse) und besteht u.a. aus Geschützrohr, Rohrwiege, Rohrbremse, Rohrvorholer und Ladeeinrichtung (gegebenenfalls).

Der Geschützseitenrichtteil (GST) dreht sich um die Seitenrichtachse (Schwenkachse, Azimutachse) und besteht u.a. aus Geschützhöhenrichtteil, Oberlafette bzw. Turm, Richtmaschinen, Ausgleicher, Stabilisierung, Ladeeinrichtung (gegebenenfalls) und Zieleinrichtung.

Der Geschützverkantungsteil (GVT) dreht sich um die Verkantungsachse und besteht meistens aus dem Geschützhöhenrichtteil und dem Verkantungsträger.

8.2.2.2. Oberlafette und Verkantungsträger

Die *Oberlafette* ist die Tragkonstruktion des Geschützseitenrichtteiles. Bei den Panzern und teilweise den Panzergeschützen übernehmen diese Funktion (neben den anderen Aufgaben als Teil des Turmes) die Turmgehäuse.

In der Oberlafette bzw. dem Turmgehäuse lagert über zwei Schildzapfen der Geschützhöhenrichtteil, drehbar um die Höhenrichtachse (Schildzapfenachse) (Bild 883, 884, 886), oder bei dreiachsigen Geschützen der Verkantungsträger, drehbar um die Verkantungsachse (Bild 885 und 814, Pkt. 8).

Die Oberlafette lagert um die Seitenrichtachse drehbar auf dem Geschützunterteil.

Diese Lagerung kann eine Pivotlagerung (Schwenkzapfenlagerung) (Bilder 883, 884, 808, 829) oder eine Drehkranzlagerung (Bilder 814, Pkt. 10, 827, 830) sein.

Bei der *Pivotlagerung* werden alle Kräfte aus dem Schuß, den Gewichten und dem Fahren durch *zwei* Horizontal-Lagerkäfte und *eine* Vertikal-Lagerkraft aufgenommen,

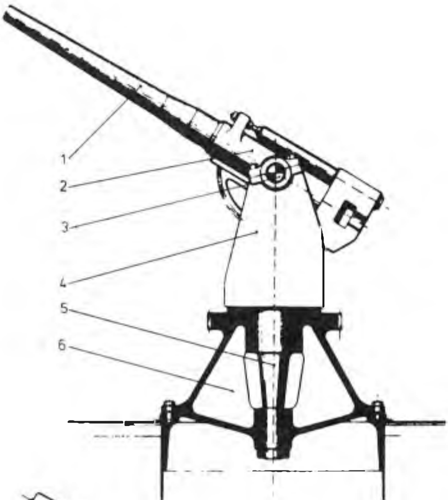


Bild 883.

Geschütz mit Oberlafetten-Pivotlagerung mit drehbarem Zapfen;
1 Geschützrohr, 2 Rohrwiege, 3 Schildzapfenlagerung, 4 Oberlafette, 5 Pivotlagerung, 6 Geschützunterteil.

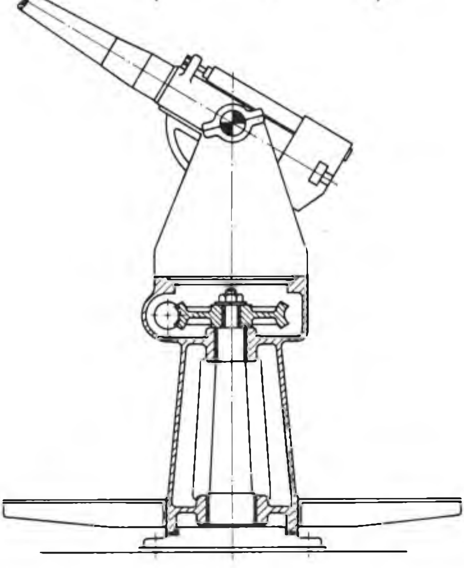


Bild 884.

Geschütz mit Oberlafetten-Pivotlagerung mit feststehendem Zapfen.

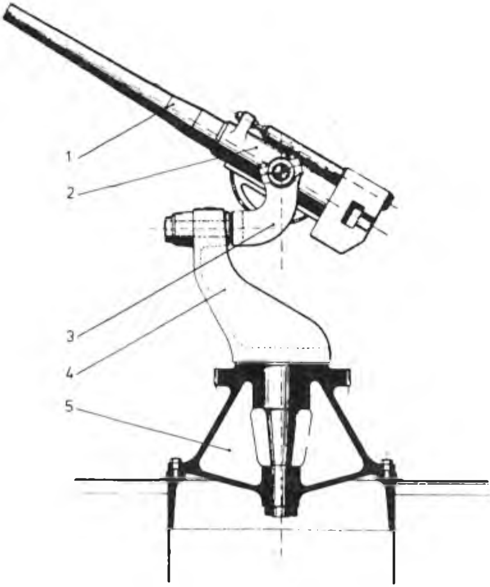


Bild 885. *Geschütz mit drei Richtachsen und Verkantungsträger;*
1 Geschützrohr, 2 Rohrwiege, 3 Verkantungsträger, 4 Oberlafette, 5 Geschützunterteil.

bei der *Drehkranzlagerung* durch *eine* Horizontal-Lagerkraft und *zwei* Vertikal-Lagerkräfte.

Das Turmgehäuse hat immer eine Drehkranzlagerung.

An der Oberlafette sind u.a. die Richtmaschinen, Ausgleicher, evtl. die Ladeeinrichtung und Zieleinrichtungen angebracht.

Im Turm befinden sich unter vielem anderen (Besatzung, Feuerleitung, Munition, Beobachtungs- und Navigationsgeräte usw.) die Richtmaschinen, seltener Ausgleicher, evtl. Lade- und Zieleinrichtungen.

Als Beispiel für die Lagerung einer Bordkanone in einem Turmgehäuse wird die von Rheinmetall entwickelte Lagerung des Höhenrichtteils einer Kampfpanzer-Bordkanone gezeigt (Bild 886) und beschrieben.

Besondere Kennzeichen:

Im Turmgehäuse 1 ist in jeder Wange 7 eine Bohrung 8 mit Schlitz 14.

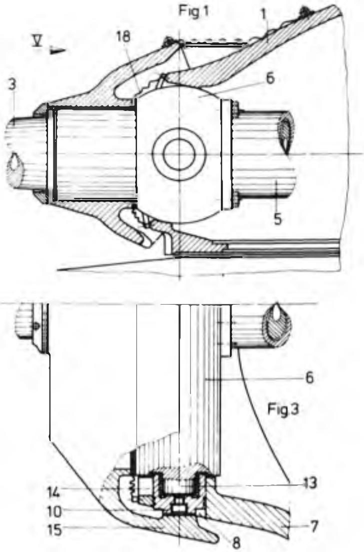


Bild 886. *Lagerung des Höhenrichtteils einer Bordkanone im Turmgehäuse eines Kampfpanzers.*

Die Wiegenwalze 6 mit Schildzapfen 13 ist aus einem Stück als Drehteil gefertigt.

Beim Einbau der Bordkanone in das Turmgehäuse werden die Schildzapfen 13 durch die Schlitze 14 in die Bohrung 8 geführt.

Dann werden die Lagerbuchsen 10 von außen in die Bohrungen 8 des Turmgehäuses 7 und über die Schildzapfen 13 geschoben.

Die Lagerbuchsen 10 werden durch die später aufgeschobene Blende 15 seitlich gehalten.

Für die gesamte Lagerung sind keine Lagerdeckel, Schrauben, Gewinde, Stifte oder dgl. vorhanden.

Membranabdichtung 18 gegen ABC-Kampfstoffe und Wasser, insbesondere beim Tauchen.

Verkantungsträger

Eine weitere Baugruppe tritt dann auf, wenn noch eine dritte Achse, die Verkantungsachse, zum Horizontalstellen der Schildzapfenachse vorhanden ist.

Bild 885 zeigt schematisch ein Geschütz, bei dem der Höhenrichtteil mit seinen Schildzapfen in einem *Verkantungsträger* gelagert ist, und andererseits der Verkantungsträger um die Verkantungsachse drehbar in der Oberlafette aufgehängt ist.

Die Ausführung eines solchen Geschützes zeigt das Bild 831 von der 3,7-cm-Schiffs-Flak S.K. C/30 Zwilling.

Die Schiffsschwankungen werden selbsttätig laufend ausgeglichen durch einen Kreisel an dem Geschützverkantungsteil, der anzeigt, ob die Schildzapfenachse Winkelbewegungen um die Verkantungsachse macht, und durch eine entsprechende Gegendrehung des Verkantungsteiles um die Verkantungsachse (s. auch Abschnitt 8.2.2.5, Stabilisierung).

Bild 814 zeigt eine andere Version des Verkantungsträgers. In diesem Falle lagert dieser 7 über einer Kugelhalbkreislaufbahn 8 in der Oberlafette 9. Diese Konstruktion wurde erforderlich, weil der Höhenrichtteil eine Turmwiege 1 hat und die Verkantungsträgerlagerung um den Turm herum gebaut werden mußte.

8.2.2.3. Ausgleicher

Die Schwerpunkte des Höhen- und Seitenrichtteiles sollten möglichst innerhalb der Höhen- und Seitenrichtachse liegen, damit hohe Richtmomente, unnötige Schwingungen und Beanspruchungen der Richtmaschinen und Lafetten beim Schießen und Fahren vermieden werden und ein gleichförmiges Feinrichten möglich ist. Dies gilt besonders, wenn beim schwankenden Fahren (Panzer oder Schiff) stabilisiert und gerichtet werden muß.

Bei manchen Geschützen, vor allem Geschützen mit einem großen Höhenrichtbereich, ist es im allgemeinen nicht möglich, den Schwerpunkt des Höhenrichtteiles in die Höhenrichtachse zu legen, weil die Feuerhöhe zu groß würde (Bilder 817, 818, 821, 822).

Bild 827 zeigt einen extremen Fall, bei dem die Schildzapfenachse weit hinter dem Geschützrohr liegt. Hier sollte eine besonders niedrige Feuerhöhe (1,25 m) und Schildzapfenhöhe erreicht werden.

In diesen Fällen muß zwischen der Oberlafette und der Wiege ein Ausgleicher gelegt werden, der die Vorderlastigkeit des Höhenrichtteiles aufhebt (Bilder 819, 821, 822).

Durch die Vorderlastigkeit entsteht ein Gewichtsdrehmoment = Gewichtskraft multipliziert mit deren Abstand von der Schildzapfenachse.

Dieses Drehmoment muß von einem Ausgleicherdrehmoment = Ausgleicherkraft multipliziert mit deren Abstand von der Schildzapfen-

achse, welches entgegen dem Gewichtsdrehmoment wirkt, aufgehoben werden, damit ein leichtes und gleichförmiges Richten möglich ist.

Das Gewichtsdrehmoment ändert sich in Abhängigkeit von der Rohrerhöhung, und zwar im wesentlichen mit dem Kosinus des Erhöhungswinkels.

Die Ausgleicherkräfte und deren Hebelarm zur Schildzapfenachse müssen bei der Konstruktion so ausgelegt werden, daß in Abhängigkeit von der Rohrerhöhung das Ausgleicherdrehmoment das Gewichtsdrehmoment jeweils gerade kompensiert.

Mit diesem Ausgleichersystem kann ein vollkommener Ausgleich nur bei ruhender Aufstellung des Geschützes auf horizontaler Unterlage erreicht werden. Wenn das Geschütz auf geneigtem Erdboden um die Schildzapfenachse gekippt ist oder wenn bei Panzerkanonen und Schiffsgeschützen durch die Schwankungen beim Fahren zusätzliche Massenkräfte am Schwerpunkt des Höhenrichtteiles auftreten, ist der Ausgleich mehr oder weniger gestört.

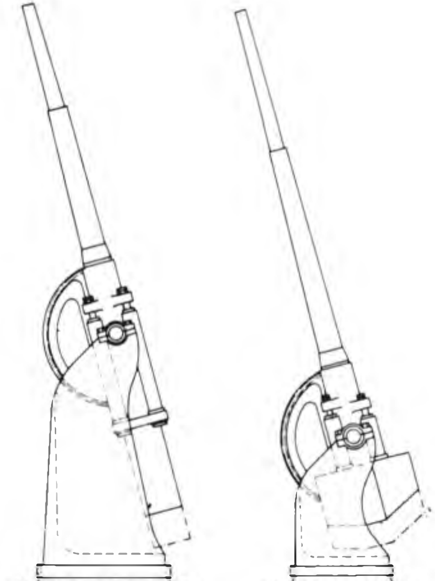


Bild 887. *Vergleich der Feuerhöhen (Schildzapfenhöhen) zweier Geschütze mit leichtem und schwerem Bodenstück.*

Die Schiffsgeschütze können deshalb keinen Ausgleicher verwenden und müssen den Schwerpunkt der Höhenrichtteile in die Schildzapfenachse verlegen. Damit die Feuerhöhe dennoch klein bleibt, wurde von Rheinmetall das „Schwere Bodenstück" eingeführt, das den Schwerpunkt des Geschützhöhenrichtteils nach hinten verlagert. Dieses Bodenstück hat außerdem den Vorteil, daß die Bremsrückstoßkraft verkleinert wird (Bild 887).

Die Ausgleicher können als Zugausgleicher (Bilder 819, 822, 891) oder als Druckausgleicher (Bilder 817, 821, 888, 889, 891) arbeiten, ferner können sie Federausgleicher (Schrauben-, Drehstab-, Spiralfeder) (Bild 888), hydropneumatische (Bild 889), pneumatische (Bild 890) oder kombinierte Feder-/pneumatische Ausgleicher (Bild 891) sein.

Wegen der Vor- und Nachteile der Ausgleicherarten siehe Tabelle 802.

Tabelle 802. *Vor- und Nachteile der Feder- und pneumatischen Ausgleicher.*

Ausgleicherart / Merkmale	Federausgleicher	pneumatische Ausgleicher
Gewicht	groß	klein
Raumbedarf	groß	klein
Reibungskräfte und damit entsprechende Richtmaschinenkräfte	klein	groß
Temperaturanfälligkeit, damit schwankende Ausgleicherkräfte und einstellbare Temperatur-Ausgleichvorrichtung	nein	ja
Bedienungsaufwand	klein	größer
Wartungsaufwand	klein	größer

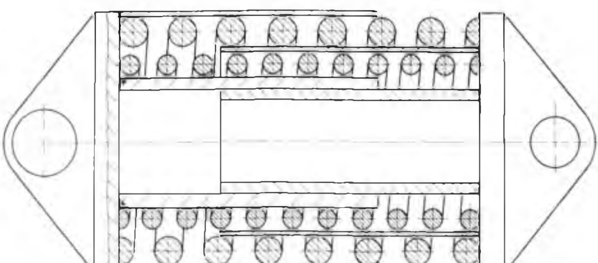


Bild 888. *Federausgleicher.*

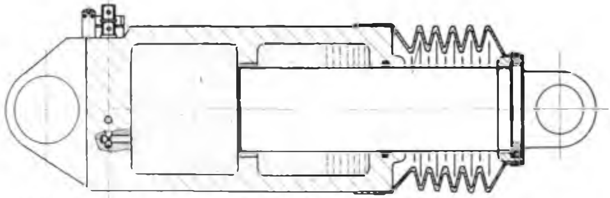


Bild 889. *Hydropneumatischer Ausgleicher.*

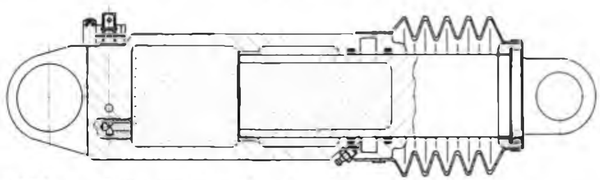


Bild 890. *Pneumatischer Ausgleicher.*

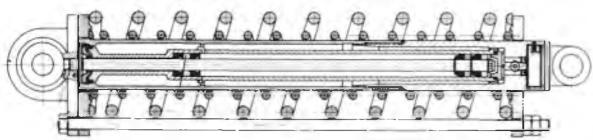


Bild 891. *Kombinierter Feder-/hydropneumatischer Ausgleicher.*

8.2.2.4. **Richtmaschinen**

Um das Geschützrohr richten und in der gerichteten Stellung halten zu können, sind Richtmaschinen erforderlich.

Die Kraftübertragung von der Richtmaschine auf den Geschützhöhen- oder -seitenrichtteil erfolgt bei großen Richtbereichen durch Zahnbögen oder Zahnkränze, in die Zahnritzel der Richtmaschinen eingreifen.

Bei kleinen Richtbereichen ist es oft vorteilhafter, Gewindespindeln (Bild 809) oder Hydraulikzylinder (Bild 892, Pkt. 3) zur Kraftübertragung zu verwenden.

Feldgeschütze und Bordkanonen von Kasemattpanzern haben meistens von Hand betriebene, mechanische Richtmaschinen (Bilder 809, 816, 819, 820).

Schwere Geschütze oder solche, die schnell und gleichförmig gerichtet werden müssen, haben hydraulische oder elektrische Richtantriebsmaschinen und hydraulische oder elektrische Steuerungen, die durch Handgriffe oder Handräder am Geschütz oder eine Fernübertragung betätigt werden.

Auf Bild 829 von der 15 cm Flak 55 ist vor der rechten Oberlafettenwand links die elektro-hydrostatische Höhenrichtmaschine mit ihrem Steuerrad und rechts die elektro-hydrostatische Seitenrichtmaschine ebenfalls mit Steuerrad zu sehen.

Bild 892 zeigt eine Übersicht über eine hydraulische Höhen- und Seitenrichtanlage für einen Kampfpanzer.

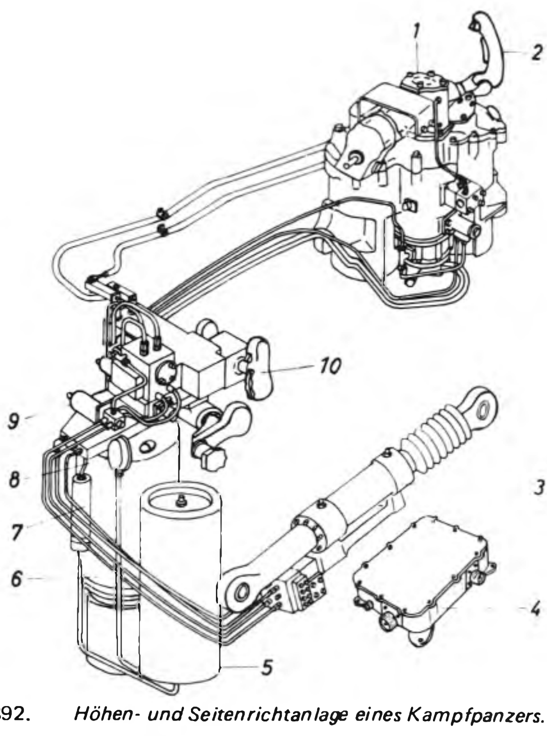


Bild 892. *Höhen- und Seitenrichtanlage eines Kampfpanzers.*

Der Höhenrichtantrieb erfolgt durch den Hydraulik-Höhenrichtzylinder 3, dessen Kolbenstangen-Lagerauge unmittelbar an dem Geschützhöhenrichtteil angreift, während das Zylinder-Lagerauge sich an dem Turmgehäuse abstützt.

Die Seitenrichtmaschine 1 hat einen Ölmotor, der über ein Getriebe, das mit einem Hand-Seitenrichtgetriebe kombiniert ist, das Seitenrichtritzel antreibt, das dann auf dem fahrzeugfesten Zahnkranz abläuft und damit dem Turm die Seitenrichtung gibt.

Der Richtschütze steuert den Höhenrichtzylinder mit zwei Handgriffen 10 an, indem er sie um eine horizontale Achse (quer zur Sitzrichtung) kippt. Der Seitenricht-Ölmotor wird angesteuert durch ein Drehen der Griffe um eine Achse in Sitzrichtung.

Der Kommandant kann den Richtschützen übersteuern und Höhen- und Seitenrichtung mit dem Griff 2 geben, und zwar durch die gleichen Kipp- und Drehbewegungen wie beim Richtschützen-Steuergriff.

Ein besonderes Problem, das in der Hauptsache die handbetriebene Höhenrichtmaschine betrifft und seit Jahrzehnten die Geschützkonstrukteure beschäftigt, ist folgendes:

Das Geschützrohr muß jederzeit in seiner Lage durch die Richtmaschinen gehalten werden. Auch durch das Schießen und die dadurch entstehenden Schwingungen darf sich das Rohr nicht nach oben oder unten bewegen, es sei denn, daß die Richtmaschinen betätigt werden. Für diesen Fall darf in der Richtmaschine keinerlei Sperrung vorliegen.

Diese Aufgabe wird gelöst durch eine Gewindespindelrichtmaschine oder eine Richtmaschine mit einem Schnecken/Schneckenradtrieb. Der Nachteil ist jedoch, daß die Richtmaschinen mit diesen selbsthemmenden mechanischen Trieben einen Wirkungsgrad unter 50 % haben.

Diese Leistungseinbuße ist besonders bei Handbetrieb sehr ungünstig. Es sind deshalb schon eine Reihe von mechanischen Konstruktionen mit einem höheren Wirkungsgrad erdacht und ausgeführt worden. Ob jedoch ein System sich bewährt hat und bei einem Seriengerät eingeführt wurde, ist nicht bekannt.

Bei hydraulischen Antrieben wird das Problem durch Sperrventile gelöst.

8.2.2.5. Stabilisierung[1]

Panzerbordkanonen und Schiffsgeschütze haben oft eine Einrichtung, die bewirkt, daß trotz Winkelbewegungen der Panzer oder Schiffe beim Fahren das Kanonenrohr seine Richtung im Raume beibehält.

---

1) Vgl. auch 6, Zielen und Richten, Abschn. 6.4.

Dieses Stabilisieren des Geschützrohres ist zu erreichen durch eine *zweiachsige Stabilisierung*, bei der die Bewegungskorrekturen, die zum Beibehalten der Richtung der Kanone im Raume notwendig ist, um die Höhenricht- und Seitenrichtachse durchgeführt werden.

Soll zusätzlich noch eine Verkantung der Schildzapfenachse ausgeschaltet werden, d.h. der ganze Turm bzw. Höhenrichtteil stabilisiert werden, so ist eine *dreiachsige Stabilisierung* erforderlich, wozu die bereits erwähnte Verkantungsachse notwendig ist (s. Abschnitt 8.2.2.1 und 8.2.2.2, Verkantungsträger, sowie Bild 885 und 814).

Bei einer zweiachsigen Stabilisierungsanlage für einen Kampfpanzer werden zwei Kreisel an dem Höhenrichtteil angebracht, mit zueinander senkrechten Achsen, die elektrische Signale abgeben, wenn Winkelbewegungen am Geschützrohr auftreten.

Je ein weiterer Kreisel am Turm und der Fahrzeugwanne zeigen an, ob diese Teile Winkelbewegungen machen.

Die Kreiselsignale werden elektronisch verarbeitet und wirken dann über elektrisch-hydraulische Servoventile auf die Höhenricht- und Seitenrichtantriebe, die praktisch verzögerungslos die Störungswinkelbewegungen korrigieren durch nach Richtung und Größe entgegengesetzte Winkelbewegungen.

8.2.2.6. Horizontierung

Flugabwehrkanonen und Schiffsgeschütze mit einer Feuerleitung (z.B. Kommandogerät) außerhalb des Geschützes und mit oder ohne Fernsteuerung der Richtmaschinen haben eine Einrichtung zum Horizontalstellen der Höhenrichtachse und Vertikalstellen der Seitenrichtachse, Horizontierung genannt.

Bild 893 zeigt schematisch eine Ausführungsart der Horizontierung.

Der Geschützseitenrichtteil lagert mit dem Pivotzapfen der Oberlafette drehbar in einer kardanisch aufgehängten Pivotzapfenlagerung. Die äußeren Kardanzapfen werden in zwei Lagern der Sockelunterlafette aufgenommen.

Der untere Teil der Pivotzapfenlagerung kann durch zwei senkrecht zueinander angeordnete Gewindespindeln nach allen Richtungen so verschwenkt werden, daß die Pivotachse senkrecht steht.

Bei einer Flugabwehr-Feldkanone werden die Gewindespindeln von Hand betätigt.

Bei Schiffsgeschützen werden die Spindeln laufend und maschinell entsprechend den Bewegungen des Schiffes gedreht, so daß der Pivotzapfen immer senkrecht steht.

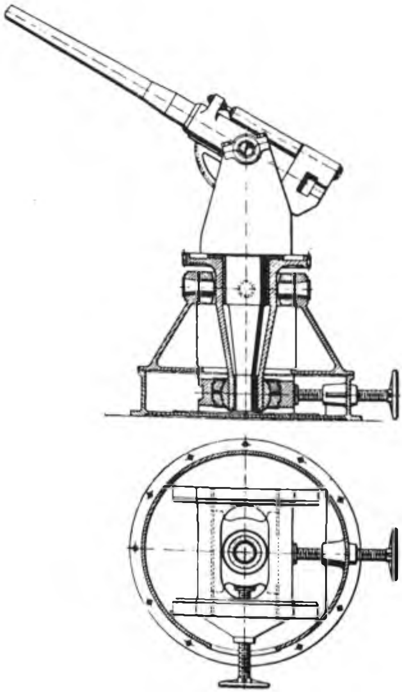


Bild 893. *Geschütz mit. Oberlafetten-Pivotlagerung und Horizontierung.*

8.2.2.7. Richt- und Schußbereichbegrenzung

Richtbereichbegrenzung

Bei manchen Geschützen wird gefordert, daß das Geschützrohr in bestimmte Teile des Höhenricht- und/oder Seitenrichtbereiches nicht einschwenken darf, z.B. weil es dann gegen Teile des eigenen Geschützes oder Fahrzeuges stößt.

Am Beispiel einer Panzerbordkanone mit hydraulischer Richtanlage soll gezeigt werden, wie diese Funktion erreicht wird.

Damit das Geschützrohr nicht gegen das Fahrzeugheck stößt, darf der Seitenrichtbereich von 4 Uhr bis 8 Uhr Turmstellung nur dann durchfahren werden, wenn die Höhenrichtstellung des Rohres über 0° beträgt.

Am Turmgehäuse ist ein elektrischer Endschalter angebracht, der durch ein Kurvenstück an dem Kanonenhöhenrichtteil entsprechend gesteuert wird, solange die Höhenrichtung des Rohres unter 0° ist.

Am Turmgehäuse ist ein weiterer Endschalter vorgesehen, der durch ein fahrzeugseitiges Kurvenstück eingeschaltet ist, solange sich der Turm in dem Seitenrichtbereich von 4 Uhr bis 8 Uhr befindet.

Die Endschalter sind in Reihe geschaltet. Sind beide Endschalter geschlossen, wird ein elektro-hydraulisches Ventil betätigt. Hierdurch wird der Ölstrom vom Höhenricht-Steuerventil zum Höhenrichtzylinder gesperrt, und der Höhenrichtzylinder erhält Drucköl aus dem Druckölspeicher, und zwar so lange, bis das Geschützrohr über 0° Erhöhung steht und über das Fahrzeugheck schwenken kann. Dann öffnet der Höhenrichtendschalter, und das elektro-hydraulische Ventil stellt den normalen Betriebszustand wieder her.

Schußbereichbegrenzung

Hierbei darf das Geschützrohr zwar ungehindert den vollen Höhen- und Seitenrichtbereich ausfahren, jedoch muß ein Schießen in bestimmten Teilen des Richtbereiches unmöglich sein, z.B. wenn eigene Anlagen oder Gebäude in der Schußlinie liegen.

Die Forderung kann erfüllt werden, wenn durch mechanische oder elektrische Einrichtungen die Abfeuerung des Geschützes gesperrt wird, solange sich das Geschützrohr in dem zu schützenden Richtbereich befindet.

Als Beispiel hierfür wird das von Rheinmetall insbesondere für automatische Schußwaffen entwickelte *Programmierbare Abfeuer- und Konturenbegrenzungsgerät PATROL* beschrieben.

Das Gerät besteht im wesentlichen aus einem Seiten- und Höhenwinkelcodierer und einer elektronischen Steuerung. Die an dem Geschütz angeordneten Seiten- und Höhenwinkelcodierer speichern die Grenzen zwischen Kampf- und Schutzbereich (Bild 894) in einem Speicher der Steuerung.

Zur Programmspeicherung fährt der Richtschütze die Grenzlinie der Höhe nach unter Beobachtung durch das Zielfernrohr (bei Berücksichtigung der Schußparabel) bei aufnahmebereit geschaltetem Speicher ab. Zu jedem Seitenwinkel wird der zugeordnete Höhenwinkel gespeichert, der später beim Richten der Waffe von der elektronischen Steuerung wieder abgefragt wird. Der gesamte Seitenwinkel von 360° wird in 2^9 =

512 Winkelschritte unterteilt und der Höhenwinkel in Bereich von -5° bis $+40^{\circ}$ in $2^6 = 64$ Schritte. Die Gesamtzahl der Kerne in der Kernspeichermatrix beträgt somit $512 \times 6 = 3072$. Die Winkelauflösung für jede Achse beträgt $0{,}7^{\circ}$ je Schritt.

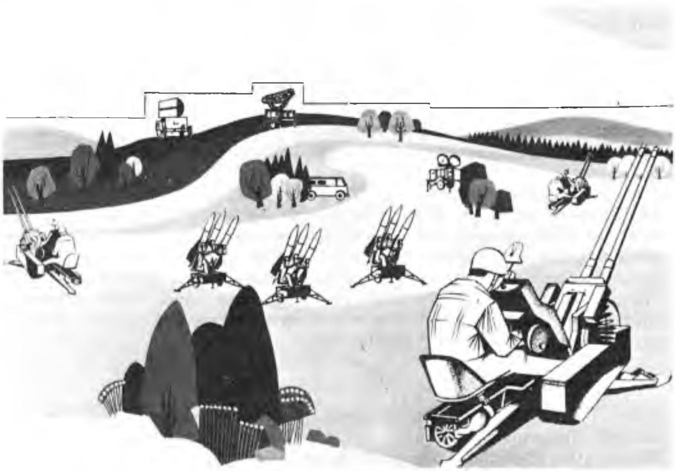


Bild 894. *Konturenpanorama zum Schußbereichbegrenzer PATROL.*

Nach einem Stellungswechsel des Geschützes werden die vorher eingespeicherten Winkelkombinationen gelöscht. Danach werden, wie vorstehend beschrieben, die neuen Werte in den Speicher eingegeben. Nach dem Umschalten auf „Feuer" wird die neue Schußbereichbegrenzung wirksam, d.h., wenn die Waffe bei der Zielverfolgung in gesperrte Bereiche fährt bzw. deren Konturen berührt, so wird – auch bei betätigtem Abfeuerpedal – die Abfeuerung gesperrt.

Es lassen sich auch Schußfeldaussparungen, sog. Fenster, mit dem Schußbereichbegrenzer speichern; die Kernspeichermatrix muß zu diesem Zweck entsprechend vergrößert werden.

Bei zwischenzeitlicher Erdzielbekämpfung kann der Schußbereichbegrenzer verzögerungslos aufgehoben werden.

8.2.3. Geschützunterteil und Fahrbarmachung

Der Geschützunterteil nimmt den Geschützseitenrichtteil auf, und zwar drehbar gelagert vermittels eines Pivotzapfens oder eines Drehkranzes (s. Abschnitt 8.2.2.2).

Die Gewichts- und Schußkräfte werden von dem Geschützunterteil an den Erdboden, ein Fahrgestell oder eine ortsfeste Bettung weitergeleitet.

Dabei ist eine wackelfreie Aufstellung des Geschützes durch Dreipunktauflage oder entsprechende Einrichtungen sowie eine ausreichende Standfestigkeit beim Schuß besonders zu berücksichtigen (s. Abschnitt 9.10).

Außerdem hat der Geschützunterteil Einrichtungen für das Fahrbarmachen oder er ist selbst das Fahrgestell.

8.2.3.1. Räderlafetten

Die durch Kraftwagen gezogenen und am Boden eingesetzen Rädergeschütze wie Mörser (Bild 802), Feldgeschütze (Bild 816, 818, 819 und 820), Gebirgsgeschütze (Bild 815), Panzerabwehrkanonen (Bild 806, 807) und Flugabwehrkanonen (Bild 825 bis 829) haben als Geschützunterteil

Räder-Dreibeinlafettierungen (Bild 802),

Räder-Spreizlafetten (Bild 806, 815 und 819),

Räder-Kreuzlafetten (Bild 816),

Räder-Rahmenlafetten (Bild 807) und

Kreuzlafetten mit absetzbaren Sonderanhängern (Bild 825 bis 829).

Räder-Dreibeinlafettierungen

Bild 802 zeigt einen schweren Mörser mit Räder-Dreibeinlafettierung. Die Rückstoßkraft beim Schuß wird ohne Rücklaufeinrichtung vom Rohr direkt über eine Kugel am Rohr und eine Kugelpfanne an der Bodenplatte 03 in den Erdboden geleitet. Das Rohr bildet das eine Bein der Dreibeinlafettierung. In der Nähe der Rohrmündung ist ein Zweibein befestigt mit einem Höhenricht-, Seitenricht- und Verkantungstrieb.

Das Zweibein 02 kann mit einem Fahrgestell 04 verbunden werden, so daß der Mörser sowohl unmittelbar mit Dreibein vom Erdboden als auch vom Fahrgestell aus schießen und außerdem von einem Kraftwagen gezogen werden kann.

Räder-Spreizlafetten

Die Geschütze mit Räder-Spreizlafetten haben ein relativ kleines Gewicht. Das Seitenrichtfeld ist wesentlich größer als bei den früheren Kastenlafetten.

Der Geschützunterteil besteht aus einer Unterlafette mit einer Drehkranz- oder Pivotlagerung für die Oberlafette, einem Fahrwerk mit

Achse, Rädern und Bremsen, zwei Holmen mit Erdspornen, die nach außen gespreizt und an der Unterlafette verriegelt werden.

Die gespreizten Holme ergeben eine große Auflagebasis, die dem Geschütz beim Schuß eine gute Standfestigkeit verleiht (vgl. 9.10.1).

Eine wackelfreie Aufstellung des Geschützes in unebenem Gelände erfordert eine Dreipunktauflage. Die Erdsporne am Ende der Spreizholme bilden zwei Auflagepunkte. Die zwei Auflagepunkte der Geschützräder werden für das Schießen ersetzt durch *einen* Auflagepunkt, indem eine Bodenplatte zwischen den Rädern abgesenkt wird und dabei die Räder anhebt (Bild 819).

Eine zweite Möglichkeit zur Erzeugung einer Dreipunktauflage besteht darin, daß die Räder zwar am Boden bleiben, die Radachse jedoch um eine Verkantungsachse an der Unterlafette frei schwingen kann. Das Verkantungsgelenk bildet statisch gesehen den dritten Auflagepunkt für das Geschütz (Bild 931 in Abschn. 9.10.1).

Zum Fahren mit Zugkraftwagen werden die Holmenden zusammengeschwenkt und verriegelt. An den Holmenden befindet sich eine Zugöse zum Anhängen an den ZKW. Bei diesem Zusammenschwenken wird automatisch die Radachse mit der Unterlafette verriegelt, so daß sie sich nicht mehr um die Verkantungsachse drehen kann.

Die auf Bild 819 gezeigte Feldhaubitze hat vorne unter dem Geschützrohr einen Hilfsantrieb, der die großen Geschützräder antreibt (bis 12 km/h). An jedem Holmende ist ein Rad angebracht, welches für das Selbstfahren hydraulisch nach unten geschwenkt wird und dabei den Holm anhebt. Diese Räder können vom Fahrer, der vorne links vom Geschützrohr sitzt, hydraulisch gelenkt werden (Bild 820).

Räder-Kreuzlafetten (Bild 816)

Die Geschütze mit Räder-Kreuzlafetten sind im allgemeinen schwerer als die mit Spreizlafetten, sie haben jedoch den Vorteil eines unbegrenzten Seitenrichtfeldes.

Die Unterlafette hat drei oder vier Holme, die die Rundumstandfestigkeit gewährleisten. Von den Holmen sind einer oder zwei fest mit dem Unterlafettenmittelteil verbunden, während zwei Holme in Fahrstellung zum Geschütz hin eingeschwenkt werden.

Bei einer Dreiholm-Unterlafette ist die wackelfreie Aufstellung im Gelände immer vorhanden. Bei vier Holmen müssen diese so eingerichtet sein, daß die Auflageteller an den Holmenden den Bodenunebenheiten angepaßt werden können, z.B. durch Gewindespindeln zum Heben und Senken der Auflageteller an den Holmenden.

In Feuerstellung sind die Räder nach oben oder seitlich nach unten weggeschwenkt, so daß sie über die Holme (Bild 816) oder die Oberlafette über die Räder hinwegschwenken können.

Räder-Rahmenlafetten

Bild 807 zeigt eine Pak mit einer Räder-Rahmenlafette. Die Unterlafette wird durch einen Rahmen in Rhombenform gebildet. An der vorderen Rhombusspitze befindet sich die Lagerung für die Oberlafette und das Fahrwerk. Die vorderen Rahmenholme verlaufen nach außen wie Spreizholme, so daß der gleiche große Seitenrichtbereich besteht wie bei der Spreizlafette. Nach hinten gehen die Holme des Rahmens wieder nach innen, schließen den Rahmen und bilden an der hinteren Rhombusspitze eine Lagermöglichkeit für einen hydrostatischen Hilfsantrieb (20 km/h), der die vorderen Geschützräder antreibt. Außerdem wird am hinteren Ende des Rahmens eine schwenkbare Achse mit zwei Rädern aufgehängt, die sich der Bodenunebenheit anpassen können. Beim Schuß wird die Schwenkbarkeit aufgehoben durch spezielle hydraulische Stoßdämpfer. Mit dem Hilfsantrieb kann die Pak schnell die Feuerstellung wechseln, ohne vom Zugkraftwagen abhängig zu sein. Sie ist immer feuerbereit, da sie ohne abzuprotzen von den Rädern aus schießt.

Kreuzlafetten mit absetzbaren Sonderanhängern

Die Bilder 825 bis 829 zeigen drei Flugabwehrkanonen mit Kreuzlafetten, die durch Sonderanhänger fahrbar gemacht werden.

Die Kreuzlafette auf Bild 825 hat drei Holme und trägt in der Mitte die Drehkranzlagerung für die Oberlafette. Das Fahrgestell hat einen U-förmigen Rahmen, an dem zwei Räder mit der Federung angelenkt sind.

Bild 826 zeigt das Geschütz in Fahrstellung. Zum Aufprotzen werden die Geschützrohre über die beiden auf Bild 825 rechts befindlichen Holme geschwenkt. Dann fährt das Fahrgestell mit der offenen Seite des U-Rahmens über den auf Bild 825 auf der linken Seite gezeigten Holm, bis der am Holmende befindliche Bolzen mit dem Fahrzeugrahmen verbunden werden kann. Dann werden die beiden anderen Holmenden mit einer Kettenwinde hochgezogen und mit dem Fahrzeugrahmen verriegelt.

Die 8,8 cm Flak 41 (Bild 827) hat eine Vierholm-Kreuzlafette, einen Sockel mit Horizontierung und Drehkranzlagerung für die Oberlafette.

Zwei Holme sind fest und zwei seitlich anschwenkbar, wie auf dem Bild 828 des Geschützes in Fahrstellung zu erkennen ist.

Das Geschütz wird fahrbar gemacht durch zwei einachsige Sonderanhänger, die über die festen Holme geschoben und im mittleren Teil der

Holme an zwei Haken eingehängt werden. Die Holmenden werden mit den Winden der Sonderanhänger hochgezogen und verriegelt.

Bild 829 zeigt die 15 cm Flak 55 mit einer sechsholmigen Plattenkreuzlafette. Die Oberlafette lagert mit einem Pivotzapfen in dem inneren Kardanring der Horizontierung, die in dem Sockel der Unterlafette eingebaut ist.

Zwei zweiachsige Sonderanhänger werden für die Fahrbarmachung direkt mit der Lafettenkreuzplatte verbunden, während vier Holme gegen die Platte geschwenkt werden.

8.2.3.2. Selbstfahrlafetten und Panzer

Die selbstfahrenden Geschütze und Panzer wie Bordmörser (Bild 803), Panzerabwehrleichtgeschütze (Bild 804), Selbstfahrgeschütze (ungepanzert) (Bild 822), Panzergeschütze (Bild 823) und Panzer (Bilder 808 bis 814) haben als Geschützunterteil Fahrgestelle mit

- Kugelpfanne und Rollenwagen (Bild 803) (speziell für den Bordmörser),
- Schlitten-Pivot-Unterlafette (Bild 804) (speziell für das Panzerleichtgeschütz),
- Drehkranz-Sockel-Unterlafetten (Bild 822),
- Pivot-Sockel-Unterlafetten,
- unmittelbarer Drehkranzlagerung (Bilder 805, 810, 811, 812, 814) und
- unmittelbarer Pivotzapfenlagerung (Bilder 808 und 809).

Die Standfestigkeit von Selbstfahrgeschützen und Panzern wird in Abschnitt 9.10.2 behandelt.

Das Bild 803 zeigt, wie der Schützenpanzer mit einer *Kugelpfanne und einem Rollenwagen* den Unterteil des Bordmörsers bildet.

Der Unterteil für das Panzerabwehrleichtgeschütz auf Schützenpanzer wird dargestellt durch einen *Schlitten*, der die *Pivotlagerung* für die Oberlafette trägt. Der Schlitten gleitet auf einer Schlittenführung, die mit dem Schützenpanzer fest verbunden ist (Bild 804).

Zum Laden wird der Schlitten mit dem Leichtgeschütz nach vorne gebracht. Die Schieß- und Marschstellung ist hinten.

Bei den Selbstfahrgeschützen und teilweise auch bei den Panzergeschützen werden im allgemeinen *Sockelunterlafetten* mit dem Fahrgestell verschraubt, die eine *Drehkranz- oder Pivotzapfenlagerung* für die Oberlafette haben (Bild 822).

Bei den Panzergeschützen und Panzerbordkanonen, bei denen ein Turmgehäuse die Funktionen der Oberlafette übernimmt, bildet das Fahrgestell den Geschützunterteil, und das Turmgehäuse ist über einen Drehkranz unmittelbar in dem Fahrgestell gelagert.

Zur Ableitung der Schußkräfte in den Erdboden sowie zur Erhöhung der Standfestigkeit (vgl. 9.10.2) haben die Fahrgestelle der Selbstfahrgeschütze und Panzergeschütze häufig hydraulisch ausfahrbare Erdstützen und Erdsporne (Bild 822) sowie Einrichtungen, um die Federung der Fahrgestelle zu sperren.

8.2.3.3. Ortsfeste Lafettierungen

Die auf den ortsfesten Bettungen aufgestellten Geschütze wie Flugabwehrkanonen (Bild 830), Schiffsgeschütze (Bild 831) und Küstengeschütze haben im allgemeinen als Geschützunterteil

Pivot-Sockel-Unterlafetten (Bild 883, 884) und

Drehkranz-Sockel-Unterlafetten (Bild 830).

Der Sockel wird vermittels Schrauben auf der ortsfesten Bettung, einem Eisenbahnwagen oder Schiff, befestigt.

8.2.4. Sonderlafettierungen

Unter Sonderlafettierungen sind hier solche zu verstehen, die in den Funktionen und dem Aufbau nicht den normalen Lafetten nach den Abschnitten 8.2.1 bis 8.2.3 entsprechen. Es sind Lafettierungen für

Geschützrohre ohne Rücklauf (Bild 802, 803),

Geschützrohre ohne Rückstoß (Bild 804),

Geschütze mit einem Rohrrücklauf und einem Lafettenrücklauf (Bild 821) und

Geschütze ohne Richtachsen (Bild 813).

Bilder 802 und 803 zeigen Mörser *ohne Rohrrücklauf* und *ohne eigentliche Richtachsen.* Die Gasrückstoßkraft wird direkt über eine Kugel am Rohr und eine Kugelpfanne an einer Bodenplatte bzw. einem Fahrzeug in den Erdboden geleitet (s. auch Abschn. 8.2.3.1 Räder-Dreibeinlafettierungen).

Gerichtet wird das Rohr mit einfachen Spindeltrieben, die das Rohr um den Kugelmittelpunkt schwenken. Rohrwiege, -bremse, -vorholer und Oberlafette fallen fort.

Auf Bild 804 ist ein Leichtgeschütz (Düsenkanone) zu sehen, bei dem beim Schuß *keine Rückstoßkraft* entsteht und demzufolge auch kein Rohrrücklauf erforderlich ist. Hier fallen Rohrbremse und -vorholer (siehe auch Abschnitt 8.1 und 8.2.3.2) fort.

Auf Bild 813 ist ein KPz dargestellt, der *keine eigentlichen Richtachsen* hat. Das Kanonenrohr ist nur rücklaufbeweglich in der Fahrzeugwanne

gelagert. Das Höhenrichten des Rohres erfolgt durch ein Anheben der Fahrzeugwanne vorne und ein Absenken hinten. Die Laufräder des Kettenfahrwerks haben eine hydropneumatische Einzelfederung. Die hydraulischen Zylinder für die Federung der vorderen und hinteren Laufräderpaare werden auch für das Heben und Senken der Wanne benutzt, indem sie je nach Drehen der Handgriffe an der Lenksäule mit Hydrauliköl beaufschlagt werden.

Das Seitenrichten des Rohres erfolgt ebenfalls durch Schwenken des gesamten Panzers, und zwar läuft beim Richten nach rechts die rechte Kette rückwärts und die linke Kette vorwärts und umgekehrt beim Richten nach links.

Bei einem Panzer übernimmt das Fahrgestell vom Standpunkt der Geschützfunktionen her gesehen die Funktion der Wiege, Oberlafette, Unterlafette und der Richtmaschinen.

Es seien noch zwei Geschütze angeführt, die zwar der Vergangenheit angehören, jedoch in bezug auf Konstruktion und Ballistik interessante Geräte darstellen.

Bild 821 zeigt eine 24-cm-Kanone mit einem seinerzeit neuartigen Rohr- und Lafettenrücklauf. Der Geschützunterteil besteht aus einer rücklaufbeweglichen Unterlafette und auf dem Erdboden verankerten Bodenplatten, auf denen die Unterlafette und damit die Gesamtlafette zurückläuft.

Das Rücklaufsystem für das Geschützrohr arbeitet wie unter 8.2.1 beschrieben, und ein im Prinzip ähnliches System wird für die rücklaufende Lafette verwendet.

84 % des Gesamt-Geschützgewichtes sind an den Rücklaufbewegungen beteiligt.

Zum Fahrbarmachen wurde das Geschütz ohne Einsatz eines Kranes in fünf Teile zerlegt und auf Sonderanhänger verlastet. In 1 bis 1 1/2 Stunden war das 55 t schwere Geschütz wieder in Feuerstellung.

Das auf Bild 824 dargestellte Eisenbahngeschütz hatte wahrscheinlich die größte Schußweite, die je eine Rohrwaffe erreicht hat.

Der Geschützhöhenrichtteil ist in einem langen Träger gelagert, der vorne und hinten rücklaufbeweglich (Lafettenrücklauf) auf je zwei Eisenbahn-Drehgestellsystemen ruht (zehn Achsen vorne, acht Achsen hinten).

Seitenrichtung wurde durch Fahren in einer Gleiskurve oder vermittels einer Gleis-Drehscheibe gegeben.

8.2.5. Panzerung und ABC-Schutz

Die Kombination von Waffe und Eigenschutz ist mindestens so alt wie Schwert und Schild. Mit der Einführung der Schußwaffen bedeutet Eigenschutz den Schutz von Mannschaft und Gerät bei Waffen, die entsprechend ihrer taktischen Aufgabe der direkten Feindeinwirkung ausgesetzt sind, gegen Munition, die aufgrund chemischer oder kinetischer Energie wirkt, und gegen ABC-Waffen.

Bei der Betrachtung des Eigenschutzes gegen Munition, deren Wirkung einen Treffer voraussetzt, ist davon auszugehen, daß einmal die Wahrscheinlichkeit eines Treffers gering gehalten und zum anderen die Wirkung eines Treffers verhindert oder zumindest reduziert werden sollte.

Um die Wahrscheinlichkeit eines Treffers so klein wie möglich zu machen, ist die dargebotene Zielfläche klein (günstige Silhouette) und bei beweglichen Waffenträgern wie Kampfpanzern die mögliche Fahrgeschwindigkeit groß zu halten.

Auf den Schutz gegen die Wirkung von Treffern durch Panzerung und auf den ABC-Schutz wird im folgenden kurz eingegangen.

8.2.5.1. Schutz durch Panzerungen an Fahrzeugen und Lafetten

Nicht nur die Mannschaft, sondern vielfach auch die elektronischen Geräte, wie Feuerleitanlagen, Rechner, sowie Regelsysteme, mit denen moderne Panzerfahrzeuge ausgerüstet sind, gilt es, durch gepanzerte Abdeckungen zu schützen, um die volle Gefechtsbereitschaft auch bei feindlichem Beschuß sicherzustellen. Ferner muß der eigene Munitionsvorrat besonders abgesichert werden, da hier ein Treffer verheerende Zerstörungen im Kampfraum zur Folge haben kann.

Genaue Kenntnis des Durchschlagsvermögens der verschiedenen Geschosse und ihrer Wirkungsweise ist notwendig, um geeignete Schutzmaßnahmen zu entwickeln.

Infanteriegeschosse und Splitter von in einigem Abstand detonierenden Granaten verlieren beim Eindringen in Stahl oder Al-Blechen sehr schnell ihre kinetische Energie. Sie können von verhältnismäßig dünnen Panzerungen fast immer abgefangen werden.

Sprenggeschosse besitzen infolge ihrer zum Querschnitt verhältnismäßig kleinen Masse kein hohes Durchdringungsvermögen. Dazu erfolgt die Geschoßzerlegung durch den Aufschlagzünder meist schon an der Oberfläche der Panzerung.

Hohlladungs- und Wuchtgeschosse hoher kinetischer Energie dagegen vermögen auch starke Panzerungen zu durchdringen, so daß ein geeigneter Schutz sehr problematisch ist. Wird jedoch davon ausgegangen, daß mit größeren Entfernungen die Treffgenauigkeit der HL-Geschosse wie auch die kinetische Energie der Wuchtgeschosse abnimmt, bietet eine geeignete Ausbildung der Panzerung doch eine Sicherheit.

Beim Auftreffen der Wuchtgeschosse sowie beim Detonieren von Sprengladungen an der Oberfläche der Panzerungen können durch Stoßwelleneinflüsse auf der Rückseite Materialbrocken abplatzen (Hopkins-Effekt), die mit großer Geschwindigkeit durch den Kampfraum fliegen. Dadurch können Zerstörungen auftreten, ohne daß das eigentliche Geschoß die Panzerung durchdrungen hat.

Eine Panzerung muß allgemein folgenden Anforderungen genügen:

möglichst hohe Beschußsicherheit,

große Sprengsicherheit, d.h. geringe Neigung zur Rißbildung und zu Ausbrüchen sowie

gute Verarbeitungsmöglichkeit, z.B. Schweißbarkeit.

Für die Auslegung einer Schutzpanzerung für Lafetten oder Fahrzeuge sind folgende Merkmale wichtig:

Starke Frontpanzerungen hoher Materialfestigkeit mit möglichst großen Neigungswinkeln und Abrundungen;
dadurch können einmal Geschosse zum Abgleiten gebracht werden, ferner wird die Durchschlagsleistung von Wuchtgeschossen durch flache Auftreffwinkel stark vermindert.

Aufbauten vor der eigentlichen Panzerung wie Verkleidungen, Blenden, Nebelbecher und andere können Geschosse ablenken oder frühzeitig und damit wirkungsbeeinträchtigend zur Zerlegung bringen.

Hinter der eigentlichen Panzerung angeordnete weitere Panzerbleche sind in der Lage, Bruchstücke von durchgeschlagenen Geschossen oder Panzermaterial abzufangen oder in weniger gefährliche Richtungen abzulenken.

Durch sinnvolle Anordnung der im Kampfraum vorhandenen Instrumente und Gerätschaften kann ebenfalls ein zusätzlicher Schutz vor Geschoßsplittern und Bruchstücken erzielt werden.

Moderne Entwicklungstendenzen gehen dahin, die Panzerung bei hoher Schutzwirkung möglichst leicht zu halten, um das Gesamtgewicht der gepanzerten Fahrzeuge zu reduzieren. Dazu laufen Untersuchungen über
Schottenpanzerungen aus mehreren Panzerstahlblechen;
Schichtpanzerungen, bestehend aus verschiedenen Werkstoffen, wobei

auch nichtmetallische Werkstoffe in Betracht gezogen werden;
Verwendung von dünnen, extrem harten Panzerblechen in Verbindung mit Materialien hoher Zähigkeit, die in der Lage sind, sich stark zu verformen.

8.2.5.2. Schutz gegen ABC-Kampfstoffe

Für den Einsatz in einem durch ABC-Waffen verseuchten Gebiet besitzen moderne Panzerfahrzeuge eine Schutzanlage, die die Außenluft über entsprechende Filter in den Mannschaftsraum drückt. Dadurch wird im Kampfraum ein Überdruck aufgebaut, der die verbrauchte Luft über undichten Stellen nach außen abströmen läßt.

Die Panzerung selbst schützt die Mannschaft vor eventueller Strahlung oder Druckwellen. Durch zusätzlich aufgebrachte Schichten aus Spezialmaterialien kann der Schutz gegen Hitze- und Neutronenstrahlung oder Kontamination verstärkt werden.

Mitgeführte Dekontaminierungsmittel sind in der Lage, außen anhaftende ABC-Kampfstoffe zu beseitigen. Die Mannschaft selbst wird zusätzlich mit entsprechender Schutzkleidung und Atemmasken ausgestattet.

8.3. Ladeeinrichtungen

Ladeeinrichtungen werden angewendet zur

- Erhöhung der Feuergeschwindigkeit,
- Verlängerung des Dauerfeuers,
- Einsparung von Ladeschützen und
- Erleichterung des Ladens.

Die Funktionen des Rohrverschlusses sind an dem Ladevorgang beteiligt und werden in die Auslegung der Ladeeinrichtungen einbezogen.

Die Ladeeinrichtungen können vollautomatisch, automatisch und teilautomatisch arbeiten.

Vollautomatisch ist eine Ladeeinrichtung, wenn ohne irgendwelche manuelle Tätigkeiten eine gewisse Anzahl von Schüssen abgegeben werden kann.

Automatisch ist eine Ladeeinrichtung, wenn der gesamte Ladevorgang automatisch abläuft und so lange geschossen werden kann, wie Patronen von außen auf einer Ablage am Geschütz zugeführt werden.

Teilautomatisch ist eine Ladeeinrichtung, wenn der gesamte Ladevorgang teils automatisch, teils manuell abläuft, also ein Ladeschütze vorhanden sein muß. In diesem Falle spricht man auch von Ladehilfen.

8.3.1. Vollautomatische Ladeeinrichtungen

Bild 829 zeigt die *15 cm Flak 55* mit einer *vollautomatischen Ladeeinrichtung.* Ein Teil des Ladevorganges entspricht dem für das linke Rohr der 12,8 cm Flak Zwilling 40 (Bild 830).

Die Patronen (Länge 1784 mm, Gewicht 71,5 kg) befinden sich in einem Magazin mit Paternosteraufzug und werden beim automatischen Schießen von einer Ladeschwinge aus einer Öffnung am oberen Teil des Magazins abgeholt.

Die Schwinge dreht sich um den Schildzapfen und übergibt die Patrone einer an der Wiege angebrachten Ladeschale, deren Lage sich laufend entsprechend der Höhenrichtung beim Verfolgen des Flugzieles ändert.

Während dieses Vorganges wird der Zeitzünder des Geschosses durch die Zünderstellmaschine laufend entsprechend der Änderung der Entfernung des Flugzieles eingestellt.

Die Ladeschale bringt die Patrone in die Rohrachse, so daß sich ein Rollenansetzer auf das Geschoß aufsetzen und die Patrone ansetzen kann. Der Verschluß schließt sich automatisch und setzt den Zündbolzen auf die elektrische Zündschraube, so daß bei eingeschaltetem Dauerfeuer der Schuß fällt, das Geschützrohr zurück- und vorläuft, der Verschluß sich öffnet, die Hülse ausgeworfen wird und die Ladeschale für den nächsten Schuß eine neue Patrone zum Ansetzen heranbringt.

Diese Einrichtung kann so lange *vollautomatisch* Dauerfeuer schießen, bis das Magazin leer ist, und außerdem *automatisch* so lange schießen, wie Patronen auf die Ablage am unteren Teil des Magazins nachgelegt werden.

Die Bilder 895 und 1006 (letzteres im Abschnitt 10.5, Prüfstände für Waffenanlagen) zeigen die *vollautomatische Ladeeinrichtung eines Kampfpanzers.*

Im Heck des Turmes befindet sich ein Magazin 2 mit 26 paternosterartig umlaufenden Munitionsbehältern 3, in die 152-mm-Patronen fünf verschiedener Munitionsarten, darunter auch Flugkörper, in beliebiger Reihenfolge eingefüllt werden können.

Zwischen dem Magazin und dem hinteren Ende des Kanonenrohres 1 befindet sich der Ladeschacht 7 mit ausfahrbarem Laderohr. Nach dem Schuß, dem Rücklauf des Rohres und dem Einschwenken des Rohres in die Ladestellung stellt das Laderohr die Verbindung zwischen dem Magazin und dem geöffneten Verschluß her, so daß ein im Turmheck angeordneter Kettenansetzer 4 eine Patrone der befohlenen Munitionsart ansetzen kann. Über den gleichen Weg holt der Ansetzer auch eine zu entladende Patrone in einen Munitionsbehälter zurück.

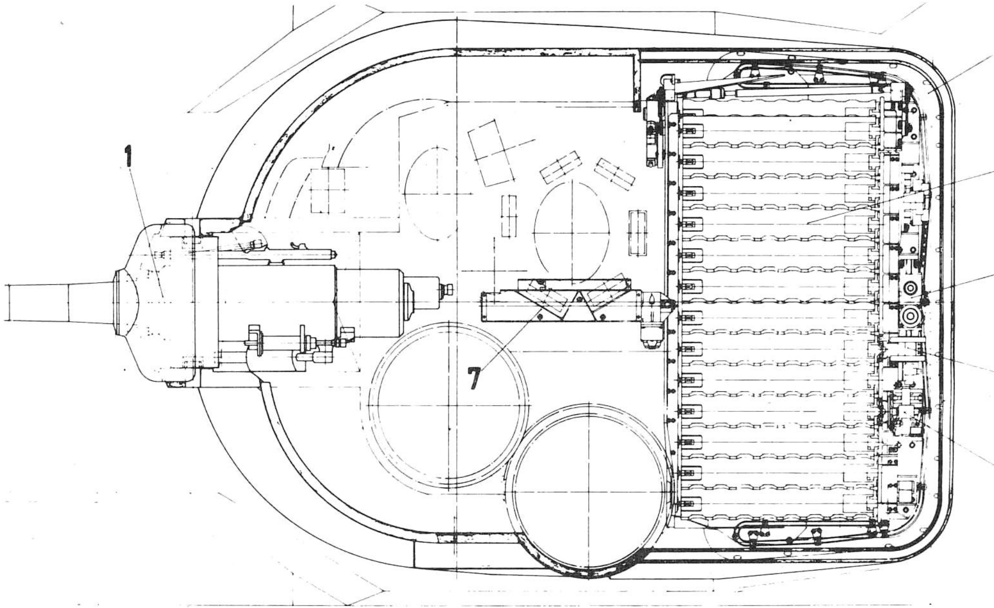


Bild 895. *Vollautomatische Ladeeinrichtung eines Kampfpanzers, von oben gesehen (Rheinmetall);* 1 Bordkanone, 2 Turmheck mit Magazin, 3 Munitionsbehälter (26 Stück), 4 Ansetzer, 5 Ausrichter für Flugkörper, 6 Aufmunitionierungsmulde, 7 Ladeschacht mit ausfahrbarem Laderohr.

Die Ladeeinrichtung arbeitet nach fünf automatischen Programmen: Aufmunitionieren, Zählen, Laden, Entladen und Umfüllen.

Die einzelnen Baugruppen der Ladeeinrichtung werden hydraulisch angetrieben. Die Steuerung erfolgt entsprechend dem eingeschalteten Programm elektronisch. Die nachfolgend aufgeführten Funktionen der Programme laufen zum Teil gleichzeitig ab.

Programm „Aufmunitionieren"

Durch eine Luke im Turmheck werden die Munitionsbehälter des Magazins mit Patronen und Flugkörpern in beliebiger Reihenfolge gefüllt. Die elektronische Steuerung sorgt dafür, daß immer ein leerer Behälter zur Verfügung steht, und zeigt an, wenn das Magazin voll ist.

Programm „Zählen"

Bei Einschaltung dieses Programms läuft das Magazin einmal um und gibt durch Leuchtziffern am Bediengerät an, wieviel Patronen von jeder der fünf Munitionsarten vorhanden sind.

Eine Änderung des Munitionsstandes, z.B. durch Verschießen, wird laufend angezeigt.

Programm „Laden"

Nach dem Auswählen der Munitionsart und dem Einschalten des Programms erfolgt automatisch:



Bild 896. *Vollautomatische Ladeeinrichtung eines Spähpanzers (von oben durch eine Turmluke gesehen).*

Schwenken des Kanonenrohres in die Ladestellung – Öffnen des Verschlusses – Prüfen, ob das Rohr frei ist – Suchen und Transportieren der gewünschten Patrone in Ansetzstellung – Ansetzen der Patrone – Schließen des Verschlusses – Schwenken des Rohres in Feuerstellung – (nach dem Schuß) Öffnen des Verschlusses – Ausziehen der FK-Hülse.

Programm „Entladen"

Bei diesem Programm erfolgt automatisch:

Suchen und Transportieren eines leeren Munitionsbehälters in Ansetzstellung – Schwenken des Rohres in Ladestellung – Öffnen des Verschlusses – Ausziehen und Ablegen der Patrone in einen Munitionsbehälter.

Programm „Umfüllen"

Durch dieses Programm wird im Fahrzeug oder Turm gelagerte Munition über den Ladeschacht vom Kampfraum aus in das Magazin umgefüllt.

Das Bild 896 zeigt die *vollautomatische Ladeeinrichtung* eines *Spähpanzers* durch eine Luke des Turmes gesehen.

Auf dem Bild 897 ist die Ladeeinrichtung schematisch dargestellt.

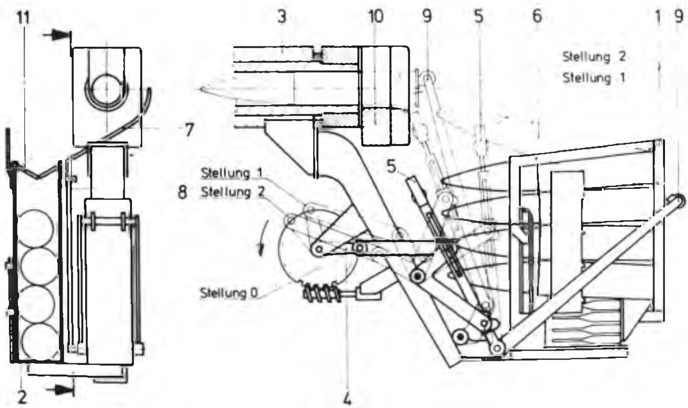


Bild 897. *Vollautomatische Ladeeinrichtung eines Spähpanzers (linkes Bild in Schußrichtung, rechtes Bild von der linken Seite bei abgenommenem Hülsenkasten gesehen).*

Das Patronenmagazin 1 und der Hülsenkasten 2 sind hinter der Bordkanone 3 an der Wiege angebracht, und zwar so tief, daß das Rohr beim Schuß darüber hinweg zurücklaufen kann.

Die gesamte Ladeautomatik wird bei einem Ladevorgang durch *eine* Umdrehung der Kurbel 4 betätigt und gesteuert, und zwar rein mechanisch und formschlüssig wie folgt:

Schwenken des Teleskophebels 5 unter die Spitze der oberen Patrone 6 (in Bild 897 bereits erfolgt) — Anheben der Patronenspitze durch Teleskopteil des Hebels 5 — Wegschwenken der Hülsenrutsche 7 durch Gestänge 8 — Greifen des Patronenbodens und Einschwenken der Patrone in das Rohr durch Heben der Hebel 9 — Schließen des Verschlusses 10 — Zurückschwenken der Hebel 5 und 9 — (Schuß, Rück- und Vorlauf) — Senken der Hülsenrutsche 7 — Öffnen des Verschlusses — Auswerfen der Hülse — Rutschen der Hülse durch die Klappen 11 in den Hülsenkasten 2 — Absaugen der Pulvergase aus den Hülsen.

Eine weitere vollautomatische Ladeeinrichtung stellt das Bild 814 dar, das die dreiachsig stabilisierte KPz-Bordkanone mit kugelförmiger Turmwiege zeigt.

Die Ladeeinrichtung ist, in Schußrichtung gesehen, in der rechten Hälfte des Turmes untergebracht. (Im linken Teil befinden sich Kommandant, Richtschütze und Fahrer.)

Das Kanonenrohr 3 hängt mit Gleitklauen 5 an zwei an der Decke des Turmes angebrachten Schienen 2, an denen es auch beim Rücklauf nach hinten gleitet. An den gleichen Schienen bewegt sich der Schraubverschluß 4 beim Öffnen und Schließen.

Drei verschiedene Munitionsarten lagern in drei Munitionsbehälterketten 11. Eine Ladeschale 12 mit Parallelogrammgestänge holt je nach gewünschter Patronenart an einer der drei Umlenkstellen der Ketten, an denen sich die Behälter auf der ganzen Länge öffnen, eine Patrone ab und bringt sie in die Rohrachse, wo sie durch den Ansetzer 13 angesetzt wird. Für die Betätigung und Steuerung der Baugruppen gilt im Prinzip ähnliches wie bei der vollautomatischen Ladeeinrichtung des Kampfpanzers.

8.3.2. Automatische Ladeeinrichtungen

Der *12,8 cm Flak Zwilling 40,* Bild 830, hat zwei automatische Ladeeinrichtungen, die spiegelbildlich gleich sind und der vollautomatischen Ladeeinrichtung auf Bild 829 bis auf das Patronenmagazin entsprechen. Statt in das Magazin werden die Patronen laufend zum automatischen Zünderstellen in die Stellschale gelegt. Von dort gelangen sie in die Ladeschale und dann verläuft der Ladevorgang wie bei der 15 cm Flak 55 (Bild 829).

8.3.3. Teilautomatische Ladeeinrichtungen

Die *8,8 cm Flak 41* (Bild 827 und 828) hat eine *teilautomatische Ladeeinrichtung* (Ladehilfe). An der linken Oberlafettenwand befinden sich zwei Ablageschalen, die laufend manuell mit Patronen gefüllt werden.

Automatisch stellt eine Zünderstellmaschine laufend die Zünder der Geschosse ein. Schon im letzten Teil des Rohrvorlaufes bringt der Ladeschütze die Patrone mit dem vorderen Teil des Geschosses in einen seitlichen Schlitz in der Ansetzvorrichtung am Bodenstück. Hiernach erfolgt automatisch: Aufsetzen von Ansetzrollen auf das Geschoß — Zentrieren der Patrone — Antreiben der Ansetzrollen durch einen Kraftspeicher mit Getriebe, der durch den Rohrrücklauf des Rohres gespannt wird — Ansetzen der Patrone — Verschlußschließen — elektrisches Anzünden — Schuß — Verschlußöffnen — Hülsenauswerfen — Rücklaufen und Vorlaufen des Rohres mit Spannen des Kraftspeichers und der Federn für die Verschlußautomatik. Schußfolge: 25 Schuß/min.

Eine weitere *teilautomatische Ladeeinrichtung für die Feldhaubitze* Bild 819 und 820 zeigen die Bilder 857 und 858.

In Bild 857 ist das Geschützrohr auf einer Trogwiege beim Vorlauf dargestellt. Vor dem Schuß wurde für den nächsten Schuß ein Geschoß in die Ladeschale, die sich auf dem Boden der Trogwiege befindet, gelegt.

Weiterer Ablauf des Ladevorganges (Bild 858):
Weiterhin Vorlaufen des Rohres mit Öffnen des Bodenverschlusses (s. Abschn. 8.1.2.4) — Anheben der Ladeschale in Rohrmitte — Spannen der Ansetzfeder — Ansetzen des Geschosses durch diese Feder — Einführen der Beuteltreibladung mit Hilfe der Ladeschale — Schließen des Verschlusses mit gleichzeitigem Senken der Ladeschale — Einlegen eines Geschosses in die Ladeschale — Schuß mit Rücklaufen und Vorlaufen des Rohres.

Teilautomatische Ladeeinrichtung für einen Kampfpanzer

Rheinmetall hat eine teilautomatische Ladeeinrichtung für einen Kampfpanzer entwickelt, die hinter der Bordkanone an der Decke und dem Flansch des Turmgehäuses befestigt ist und folgenden Ladevorgang hat:

Einschieben einer Patrone in eine senkrecht stehende Ladeschale durch den Ladeschützen — Automatisches Hochgleiten des Schlittens, an dem die Ladeschale schwenkbar befestigt ist, entlang der an der Turmdecke und am Turmflansch befestigten Säulenschiene — Einschwenken der Ladeschale mit Patrone in die Höhenrichtlage des Geschützrohres — Laufendes automatisches Mitgehen von Ladeschale, Patrone und Lade-

schalenschlitten, entsprechend der sich laufend ändernden Höhenrichtlage des Rohres infolge von Höhenrichten und Stabilisieren des Rohres beim Fahren – Manuelles Ansetzen der Patrone – Zurückschwenken und Gleiten der Ladeschale und des Schlittens in die Ausgangsstellung – Keilschließen – Schuß.

Die automatischen Bewegungen der Ladeeinrichtung werden hydraulisch angetrieben und gesteuert.

Literatur

[1] Szabó, I.: Höhere Technische Mechanik. Berlin, Göttingen, Heidelberg 1960.
[2] Siebel, E.: Die Festigkeit dickwandiger Hohlzylinder. Konstruktion 3 (1951) H.5.
[3] Heckel, K.: Einführung in die technische Anwendung der Bruchmechanik. München 1970.

9. Geschützmechanik

9.1. Begriff der Geschützmechanik

Während die Ballistik das Verhalten der Treibladung und des Geschosses beim Schuß behandelt, beschäftigt sich die Geschützmechanik mit dem Verhalten aller Waffen- und Lafettenteile beim Schuß, und zwar sowohl in bezug auf Kräfte und Beanspruchungen als auch in bezug auf den zeitlichen Ablauf von Bewegungen.

9.2. Verwendete Bezeichnungen

Die Bezeichnungen wurden einerseits an die allgemeine Norm für Formelzeichen DIN 1304, Ausgabe November 1971, angepaßt, und anderseits wurden soweit als möglich Bezeichnungen berücksichtigt, die im einschlägigen Fachschrifttum fest eingebürgert sind. In manchen Fällen ließ sich im Interesse einer möglichst kurzen und übersichtlichen Schreibweise der in diesem Kapitel entwickelten Gleichungen nicht vermeiden, daß Buchstaben verwendet wurden, die in anderen Fachgebieten und auch in anderen Abschnitten dieses Buches eine abweichende Bedeutung haben.
Innerhalb des Kapitels Geschützmechanik sind die Bezeichnungen eindeutig.

In Übereinstimmung mit der nach Einführung des Internationalen Einheitensystems in der allgemeinen Technik üblichen Terminologie wird unterschieden zwischen Gewichtskräften in N und Gewichten oder Massen in kg.

A	[Nm]	Arbeit
D	[mm]	Kaliber
E	[Nm]	kinetische Energie, Wucht
E_G	[Nm]	Geschoßwucht
E_L	[Nm]	Wucht der Pulvergase
E_R	[Nm]	Rücklaufwucht
F_0	[N]	Gaskraft
F_1	[N]	Lafettenbelastung
F_A	[N]	Ausgleicherkraft
F_G	[N]	Gaskraft am Geschoßboden
F_M	[N]	Mündungsbremsenkraft
F_R	[N]	Gaskraft am Rohrboden
F_u	[N]	Leistenkraft
F_v	[N]	Vorholerkraft
F_w	[N]	Richtmaschinenkraft
G_R	[N]	Rücklaufgewichtskraft
G_W	[N]	Gewichtskraft der Rohrwiege
H	[N]	Flüssigkeitsbremskraft

I	[Ns]	Antrieb, Bewegungsgröße (Impuls)
I_{Br}	[Ns]	Bremsantrieb
I_G	[Ns]	Geschoßimpuls
I_L	[Ns]	Impuls der Pulvergase
I_M	[Ns]	Gaskraftantrieb an der Mündungsbremse
I_R	[Ns]	Gaskraftantrieb, Impuls der Rücklaufmasse
J_A	[kgm^2]	Massentragheitsmoment in bezug auf Achse A
J_G	[kgm^2]	Massenträgheitsmoment des Geschosses um die Längsachse
K	[N]	gesamte Bremskraft
M_d	[Nm]	Drallmoment
N	[N]	Führungskraft
Q	[mm^2, m^2]	wirksame Kolbenfläche
R	[N]	Reibungskraft
S	[N]	Schildzapfenkraft
T	[K]	Temperatur
V_o	[m^3]	Anfangsvolumen des Vorholers
V_ρ	[m^3]	Endvolumen des Vorholers
W	[N]	Geschoßwiderstand im Rohr
a	[m/s^2]	Beschleunigung
c_{fl}	[J/kgK]	spezifische Wärme der Bremsflüssigkeit
d	[m]	Schwerpunktsabstand der Rücklaufmasse
g	[m/s^2]	Fallbeschleunigung
i	[mm]	Trägheitshalbmesser
m	[—]	Kraftverhältnis des Vorholers
m	[kg]	Masse
m_G	[kg]	Geschoßmasse (-gewicht)
m_L	[kg]	Masse (Gewicht) der Ladung (Pulvergase)
m_R	[kg]	Rücklaufmasse (-gewicht)
p	[N/mm^2, MPa]	Gasdruck, Flüssigkeitsdruck
q	[mm^2, m^2]	Seelenquerschnitt, Durchflußquerschnitt
s	[m]	Weg
s_{Ra}	[m]	Rücklaufweg bis Geschoßaustritt
s_{Rn}	[m]	Rücklaufweg während der Nachwirkung
t	[s]	Zeit
t_a	[s]	Geschoßdurchlaufzeit
t_{Br}	[s]	Bremsdauer
t_e	[s]	gesamte Gaskraftdauer
t_n	[s]	Nachwirkungsdauer
v_G	[m/s]	Geschoßgeschwindigkeit
v_R	[m/s]	Rücklaufgeschwindigkeit
v_o	[m/s]	Mündungsgeschwindigkeit
w	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit der Pulvergase
α	[°]	Drallwinkel
β	[—]	Nachwirkungsbeiwert
ϵ	[°]	Erhöhung
η_M	[—]	Wirkungswert der Mündungsbremse

λ_M	[–]	Triebziffer der Mündungsbremse
μ	[–]	Reibungszahl
$1/\xi$	[–]	Strömungsbeiwert
ρ_{Fl}	[kg/m^3]	Dichte der Bremsflüssigkeit
ρ	[m]	gesamter Rücklaufweg
σ_M	[–]	Leistungsziffer der Mündungsbremse
ω	[rad/s]	Drehgeschwindigkeit

Fußzeiger (Indizes)

o bzw. m	ohne bzw. mit Mündungsbremse
a	bei Geschoßaustritt
e	am Ende der Gaskraftwirkung

Sonstige Zeichen

$\bar{x}$	(x überstrichen)	Mittelwert von x
$\hat{x}$	(x Spitze)	Höchstwert von x
Δx	(Delta x)	Zuwachs von x
$\dot{x}$	(x Punkt)	dx/dt

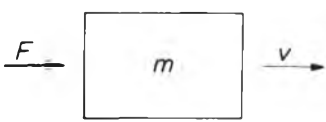
9.3. Einige wichtige Grundregeln der Mechanik

Da die in der Geschützmechanik betrachteten Bewegungsvorgänge vorwiegend in Richtung der Seelenachse verlaufen, kann die im allgemeinen übliche vektorielle Schreibweise der Bewegungsgleichungen zweckmäßigerweise durch die in diesem Fall einfachere Komponentenschreibweise ersetzt werden.

Die folgenden allgemeingültigen Gleichungen (1), (4) und (5) können auch als Komponentengleichungen für eine bestimmte Richtung, zum Beispiel die Richtung der Seelenachse, verstanden werden, wobei anstelle von vektoriellen Größen jeweils nur die Beträge, zum Beispiel der Kräfte, Beschleunigungen usw., positiv oder negativ einzusetzen sind.

Für die Bewegung einer Masse unter dem Einfluß äußerer Kräfte gelten folgende Regeln:

Dynamische Grundgleichung für Längsbewegung (Translation)

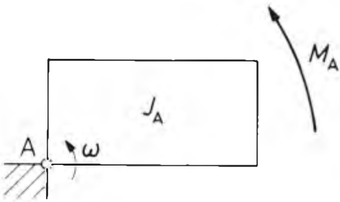


$$F = m\frac{dv}{dt} = ma, \qquad (1)$$

d.h. Kraft = Masse x Beschleunigung.

Bild 901. *Zu Gleichung (1).*

Dynamische Grundgleichung für Drehbewegung (Rotation)



$$M_A = J_A \frac{d\omega}{dt}, \qquad (2)$$

d.h. Moment um die Drehachse A = Massenträgheitsmoment um die Drehachse A x Drehbeschleunigung.

Bild 902. *Zu Gleichung (2).*

Energiesatz

$$\int F dx = \Delta \left(\frac{mv^2}{2}\right) = \Delta E, \qquad (3)$$

d.h. Arbeit der äußeren Kräfte
= Zunahme der kinetischen Energie.

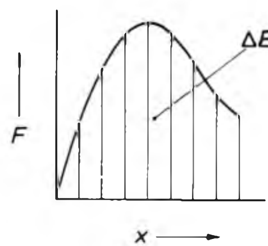


Bild 903. *Zu Gleichung (3).*

Impulssatz

$$\int F dt = \Delta(mv) = \Delta I, \qquad (4)$$

d.h. Antrieb der äußeren Kräfte
= Zunahme der Bewegungsgröße
oder des Impulses.

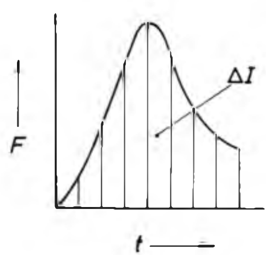


Bild 904. *Zu Gleichung (4).*

Der Impulssatz gilt auch für ein Massensystem, wobei sich die Antriebe der inneren Kräfte zwischen den einzelnen Massen aufheben und nur die Antriebe der äußeren Kräfte F_a übrigbleiben, d. h.

$$\Sigma \int F_a\, dt = \Sigma \Delta (mv). \qquad (5)$$

9.4. Grundsätzliche Verfahren für den Abschuß eines Geschosses

Die Aufgabe, einem Geschoß unter Ausnutzung der Verbrennungsenergie eines Treibstoffes die zur Erreichung eines Zieles erforderliche Geschwindigkeit zu erteilen, kann auf verschiedene Art gelöst werden, wobei sich für die Belastung des Geschützes beim Schuß grundsätzlich verschiedene Bedingungen ergeben.

In der schematischen Darstellung Bild 905 stellt Fig. a eine normale Rohrwaffe dar; daraus wird das rückstoßfreie Geschütz (Fig. b) dadurch entwickelt, daß der Ladungsraum nach rückwärts in einer Düse geöffnet wird; der Übergang zur Rakete (Fig. c) erfolgt dadurch, daß die Wandung des Ladungsraumes einschließlich Düse mit dem Geschoß verbunden wird.

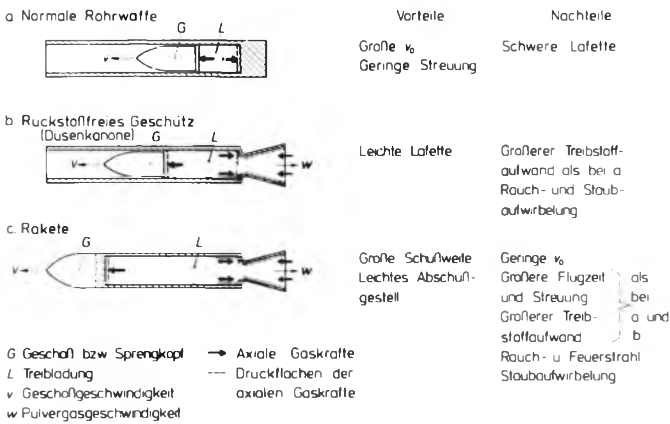


Bild 905. *Verfahren für den Abschuß eines Geschosses.*

Aus den schematisch eingezeichneten Druckkräften der Pulvergase ist zu erkennen, daß bei der *normalen Rohrwaffe* das Rohr außer durch den statisch ausgeglichenen radialen Gasdruck durch eine über den Rohrboden verteilte axiale Gaskraft belastet wird.

Beim *rückstoßfreien Geschütz* kann durch entsprechende Gestaltung der Düse erreicht werden, daß sich die axialen Komponenten der Gaskräfte, die einerseits auf die ringförmige Bodenfläche des Ladungsraumes und anderseits auf die Trichterfläche der Düse wirken, vollständig aufheben.

Bei der *Rakete*, die als ein mit dem Geschoß verbundenes Düsenrohr angesehen werden kann, wirkt auf das Gesamtsystem in Vortriebsrichtung sowohl der Gasdruck auf die Stirnfläche des Ladungsraumes als auch die Längskomponente des Gasdrucks im Düsentrichter. Zur Führung der Rakete beim Abschuß ist nur ein leichtes Abschußgestell erforderlich.

Es ist auch möglich, den Vergleich zwischen den drei Waffenarten mit Impulsbetrachtungen durchzuführen. Impulsgrößen sind leichter rechnerisch zu erfassen, so daß bei den Berechnungen der Abschnitte 9.6 und 9.7 davon vorwiegend Gebrauch gemacht wird, während für eine grundlegende Betrachtung die Kräfte anschaulicher sind.

Die normale Rohrwaffe hat den Nachteil, daß der während des Abschusses nach rückwärts auf das Rohr wirkende Gaskraftimpuls die Lafette auch bei Zwischenschaltung einer Rücklaufeinrichtung hoch belastet. Sie wird trotzdem wegen ihrer sonstigen Vorteile für die Kampfpanzerbewaffnung, für die Panzerabwehr und als Artilleriewaffe überwiegend benutzt. Die folgenden Abschnitte behandeln ausschließlich die Kräfte und Bewegungsvorgänge bei der normalen Rohrwaffe.

9.5. Belastung des Rohres beim Schuß

Ausgangsbasis für alle am Geschütz beim Schuß auftretenden Kräfte und Bewegungsvorgänge sind die von der Treibladung und dem Geschoß auf das Rohr übertragenen Kräfte mit ihrem zeitlichen Verlauf.

Während für die Bewegung des Geschosses nur der Verlauf des Gasdruckes – der abhängig von der Zeit als $p = f(t)$ dargestellt werden kann (s. Bild 906) – bis zum Augenblick des Geschoßaustrittes aus der Mündung maßgebend ist, kommt es für die Bewegung eines verschieblich gelagerten Geschützrohres (s. Abschnitt 9.6) auch noch wesentlich auf die sogenannte Nachwirkung der Pulvergase während der

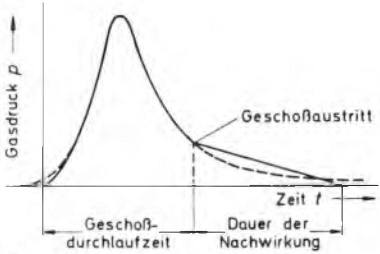


Bild 906. *Gasdruckverlauf beim Schuß.*

Zeit an, in der sich das Rohr entleert und der Gasdruck bis auf Atmosphärendruck absinkt. Obwohl sich die Kurve des Gasüberdruckes in Wirklichkeit zuletzt asymptotisch der Nullinie nähert (s. gestrichelte Linie in Bild 906), wird im folgenden zur Vereinfachung die Kurve des Gasdruckes bzw. der resultierenden Gaskraft jeweils so dargestellt, als ob vom Geschoßaustritt an der Gasdruck etwa linear mit der Zeit auf Null absinken würde, so daß nach einer verhältnismäßig kurzen Zeit das Ende der Nachwirkung erreicht ist. Da es für die Wirkung auf das frei verschiebliche Rohr letzten Endes nur auf den Gesamtimpuls $\int p\,dt$ während der Nachwirkungsdauer ankommt (siehe z.B. Seite 395), ist diese Vereinfachung bei den meisten Berechnungen der Geschützmechanik zulässig, wenn man nur dafür sorgt, daß der aus der vereinfachten Darstellung folgende Nachwirkungsimpuls mit dem wirklichen Nachwirkungsimpuls übereinstimmt.

Zur Vereinfachung der Darstellung wird auch vernachlässigt, daß die Geschoßdurchlaufzeit erst dann beginnt, wenn die Gaskraft die Größe des Einpreßwiderstandes erreicht hat.

Der allseitig auf das Rohr wirkende Gasdruck p (Bild 907) beansprucht die Rohrwandung mit Spannungen, die hier nicht näher untersucht werden sollen[1]. Hier sollen nur die resultierenden Kräfte auf das Rohr betrachtet werden, die für Bewegungsvorgänge des Rohres und für die Belastung der Lafette maßgebend sind. Dabei stehen offenbar alle radialen Druckkräfte im statischen Gleichgewicht. Das Gleiche gilt nach einer bekannten hydrostatischen Regel für die Horizontalkomponenten der Druckkräfte auf die durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnete Innenfläche des Ladungsraumes.

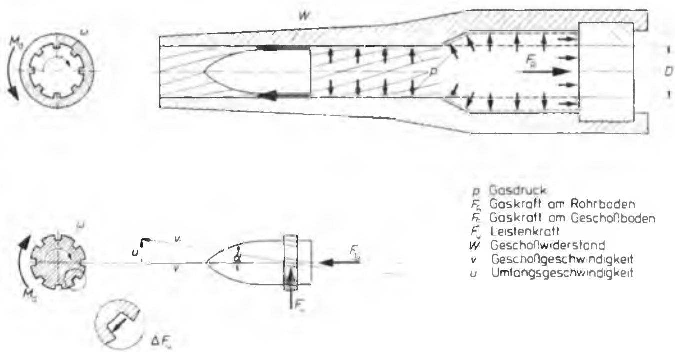


Bild 907. *Von Treibladung und Geschoß herrührende Kräfte am Rohr.*

---

[1] S. 8.1.6, Berechnung der Geschützrohre.

9.5.1. Kräfte am glatten Rohr für flügelstabilisierte Geschosse

Als nicht ausgeglichene Kräfte bleiben beim glatten, nicht gezogenen Rohr

1. die Gaskraft auf eine Kreisfläche vom *Kaliber*durchmesser D (also nicht auf die Querschnittsfläche des *Ladungs*raumes), d.h.

$$\text{Gaskraft } F_R = pq = p\,\frac{\pi D^2}{4}, \tag{6}$$

auch Gasrückstoßkraft genannt (vgl. 8.2.1.1),

2. der Geschoßwiderstand W, der durch das erste Einpressen des Führungsbandes und durch die Reibung beim Durchlauf durch das Rohr zustande kommt.

   Der Geschoßwiderstand W ist bei glatten Rohren kleiner als 1 % der Gaskraft F_R und kann daher bei der Berechnung der Rohrbewegung im allgemeinen vernachlässigt werden.

9.5.2. Kräfte am gezogenen Rohr für drallstabilisierte Geschosse

In gezogenen Rohren wird dem Geschoß durch die schraubenförmig in die Rohrwandung eingeschnittenen Züge die zur Stabilisierung erforderliche Drehgeschwindigkeit erteilt.

Durch die Züge wird der Seelenquerschnitt etwas vergrößert. Ohne Kenntnis der genauen Abmessungen kann man bei Geschützen näherungsweise

$$q = 0{,}805\,D^2$$

setzen (vgl. 11.5.2).

Herrührend von der Drehbeschleunigung des Geschosses wirken auf das Rohr zusätzliche Kräfte, die im folgenden berechnet werden.

Wenn die Züge unter dem Drallwinkel α zur Längsrichtung des Rohres verlaufen, bewegt sich ein Punkt des Führungsbandes (Bild 907 unten) in der mit v_r (resultierende Geschwindigkeit) bezeichneten Richtung, so daß für die Umfangsgeschwindigkeit des Geschosses

$$u = v \cdot \tan\alpha \tag{7}$$

gilt. Daraus folgt für die Beschleunigungen in Umfangsrichtung a_u und in Schußrichtung a_l

$$a_u = a_l \cdot \tan\alpha \tag{8}$$

und für die Drehbeschleunigung des Geschosses

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{a_l \cdot \tan\alpha}{D/2} . \tag{9}$$

Aus der dynamischen Grundgleichung für Drehbewegung (2) ergibt sich bei einem Massenträgheitsmoment des Geschosses J_G das am Führungsring aufzubringende Drehmoment (Drallmoment)

$$M_d = J_G \cdot \frac{d\omega}{dt} = J_G \cdot \frac{a_l \tan\alpha}{D/2} . \tag{10}$$

Für die Beschleunigung des Geschosses mit der Masse m_G durch die Gaskraft am Geschoßboden F_G gilt bei Vernachlässigung des Geschoßwiderstandes näherungsweise

$$a_l \approx \frac{F_G}{m_G} . \tag{11}$$

Mit

$$J_G = m_G \cdot i^2 \tag{12}$$

(i = Trägheitshalbmesser des Geschosses)

erhält man aus (10)

$$M_d = m_G \, i^2 \cdot \frac{F_G}{m_G} \cdot \frac{\tan\alpha}{D/2} . \tag{13}$$

Die gesamte am Führungsring aufzubringende Umfangskraft F_u ist somit

$$F_u = \frac{M_d}{D/2} = \left(\frac{i}{D/2}\right)^2 \cdot \tan\alpha \cdot F_G . \tag{14}$$

Ein gleich großes, im umgekehrten Drehsinn wirkendes Drehmoment wirkt zurück auf das Rohr (Bild 907 oben). Bei Rechtsdrall des Geschosses wird also auf das Rohr ein Drehmoment im Gegenuhrzeigersinn (in Schußrichtung gesehen) übertragen.

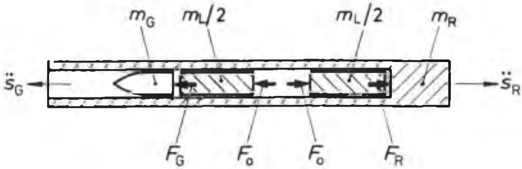
Für Sprenggranaten gilt näherungsweise

$$\left(\frac{i}{D/2}\right)^2 \approx 0{,}53 \text{ (vgl. 11.5.1.1)}, \tag{15}$$

so daß mit einem auf das Rohr wirkenden Drallmoment

$$M_d = 0{,}53 \cdot F_G \cdot D/2 \cdot \tan\alpha \tag{16}$$

zu rechnen ist. Dabei ist die Gaskraft F_G am Geschoßboden infolge der in den beschleunigten Pulvergasen wirkenden Massenkräfte etwas kleiner als die Gaskraft F_R am Rohrboden.



m_R	Rohrmasse	F_G	Gaskraft am Geschoßboden
m_G	Geschoßmasse	F_0	Gaskraft in Ladungsmitte
m_L	Ladungsmasse	$\ddot{s}_R$	Rohrbeschleunigung
F_R	Gaskraft am Rohrboden	$\ddot{s}_G$	Geschoßbeschleunigung

Bild 908. *Gedankenmodell zur Ermittlung von F_G.*

Nimmt man näherungsweise an (s. Bild 908), daß die eine Hälfte der Ladungsmasse mit dem Geschoß die Beschleunigung

$$\frac{d^2 s_G}{dt^2} = \ddot{s}_G$$

und die andere Hälfte mit dem rücklaufenden Rohr die Beschleunigung $\ddot{s}_R$ erfährt, so ergeben sich aus der dynamischen Grundgleichung (1) für die diese Beschleunigungen erzwingenden Gaskräfte einerseits die Beziehungen

$$F_R = m_R \ddot{s}_R \tag{17}$$

und

$$F_o = (m_R + m_L/2)\,\ddot{s}_R = F_R \frac{m_R + m_L/2}{m_R} \tag{18}$$

oder, da $m_L \ll m_R$,

$$F_o \approx F_R \tag{18a}$$

und anderseits

$$F_G = m_G \ddot{s}_G \tag{19}$$

und

$$F_o = (m_G + m_L/2)\,\ddot{s}_G = F_G \frac{m_G + m_L/2}{m_G}. \tag{20}$$

Aus den Gleichungen (18a) und (20) folgt

$$F_G \approx F_R \frac{m_G}{m_G + m_L/2}. \tag{21}$$

Mit der Umfangskraft F_u ist eine Reibungskraft zwischen den Flanken der ineinandergreifenden Leisten des Führungsbandes und des Rohres

verbunden. Ferner hat die senkrecht auf die Leisten wirkende Leistenkraft eine Komponente in Schußrichtung.

Praktisch liegt der Drallwinkel etwa im Bereich

$$\alpha \approx 4^\circ \text{ bis } 8^\circ$$

und somit $\tan\alpha \approx 0{,}070$ bis $0{,}141$.

Damit wird nach Gleichung (14) und (15)

$$F_U \approx (0{,}04 \text{ bis } 0{,}08)\, F_G.$$

Da $\tan\alpha$ und F_U/F_G verhältnismäßig klein sind, kann man mit einer für die Berechnung der Rohrbewegung ausreichenden Genauigkeit — obwohl Leistenkraft und Umfangskraft nicht identisch sind — näherungsweise die Reibung gleich μF_U und die Komponente der Leistenkraft in Schußrichtung gleich $\tan\alpha \cdot F_U$ setzen. Die Reibungszahl μ für einen Kupferführungsring liegt etwa bei 0,15.

Der gesamte Zugwiderstand in einem gezogenen Rohr beträgt also näherungsweise

$$W \approx (\mu + \tan\alpha)\, F_U \qquad (22)$$

oder mit Gleichung (14)

$$W \approx \left(\frac{i}{D/2}\right)^2 (\mu + \tan\alpha) \tan\alpha \cdot F_G. \qquad (22a)$$

Beispiel: 105-mm-Haubitze

Gegeben:

$$D = 105 \text{ mm}$$

Konstanter Drallwinkel

$$\alpha = 7^\circ$$
$$m_G = 15{,}0 \text{ kg}$$
$$m_L = 3{,}0 \text{ kg}$$

Maximaler Gasdruck am Rohrboden

$$\hat{p} = 2600 \text{ bar} = 260 \text{ N/mm}^2$$

Berechnet:

Seelenquerschnitt

$$q = 0{,}805 \cdot 105^2 = 8880 \text{ mm}^2$$

Maximale Gaskraft am Rohrboden (Gasrückstoßkraft)

$$\hat{F}_R = 260 \cdot 8880 = 2310 \cdot 10^3 \text{ N} = 2310 \text{ kN}.$$

Max. Gaskraft am Geschoßboden

$$\hat{F}_G = 2310 \cdot \frac{15}{15 + 1{,}5} = 2100 \text{ kN}$$

Drallmoment

$$\hat{M}_d = 0{,}53 \cdot 2100 \cdot 52{,}5 \cdot 0{,}123 = 7190 \text{ kNmm} = 7{,}19 \text{ kNm}$$

Zugwiderstand

$$\hat{W} \approx 0{,}53\,(0{,}15 + 0{,}123)\,0{,}123 \cdot 2100 \approx 37 \text{ kN}$$

9.6. Belastung der Lafette beim Schuß

9.6.1. Arten der Rohrlagerung

Die Wirkung der am Rohr angreifenden Kräfte auf die Lafette hängt von der Art der Rohrlagerung ab.

Bild 909 gibt einen Überblick über die charakteristischen Fälle, die mit den dargestellten Kraft-Weg- und Kraft-Zeit-Diagrammen in den folgenden Abschnitten ausführlicher behandelt werden. In die Skizzen, die nur schematisch die Art der Kraftübertragung andeuten, ist jeweils die Gasrückstoßkraft F_0 und die von der Lafette her entgegenwirkende Kraft F_1 eingetragen. Die Kraft-Zeit-Diagramme zeigen einerseits den bei allen vier Beispielen gleich angenommenen zeitlichen Verlauf der Gaskraft $F_0 = f(t)$ und anderseits den Verlauf der Lafettenbelastung $F_1 = f(t)$.

Die Drallkräfte, die gegenüber der Gasrückstoßkraft von untergeordneter Bedeutung sind, werden in dieser Übersicht nicht berücksichtigt (s. hierzu 9.9.2).

Da bei vollkommen starrer Lagerung des Rohres in einer starren Lafette (Bild 909, Fall 1) in jedem Augenblick die Gegenkraft F_1 ebensogroß ist wie die Gasrückstoßkraft F_0, würde diese Art der Lagerung im allgemeinen eine untragbar große Belastung der Lafette ergeben. Beispielsweise wäre bei einer 105-mm-Feldhaubitze der Maximalwert der Lafettenbelastung $\hat{F}_1 = \hat{F}_0 = 2310$ kN.

Praktisch wird deshalb heute bei allen schweren und auch bei vielen leichten Waffen das Prinzip des langen Rohrrücklaufes (Bild 909, Fall 2 und 3) angewendet, wobei das Rohr unter dem Einfluß der Gaskraft in einer Gleitführung zurückläuft. Die Gaskraft wirkt somit nach rückwärts nur als Beschleunigungskraft für die rücklaufenden Teile. Die aufgespeicherte Wucht wird durch eine hydraulisch erzeugte Bremskraft längs eines bestimmten Rücklaufweges aufgezehrt. Im wesentlichen tritt

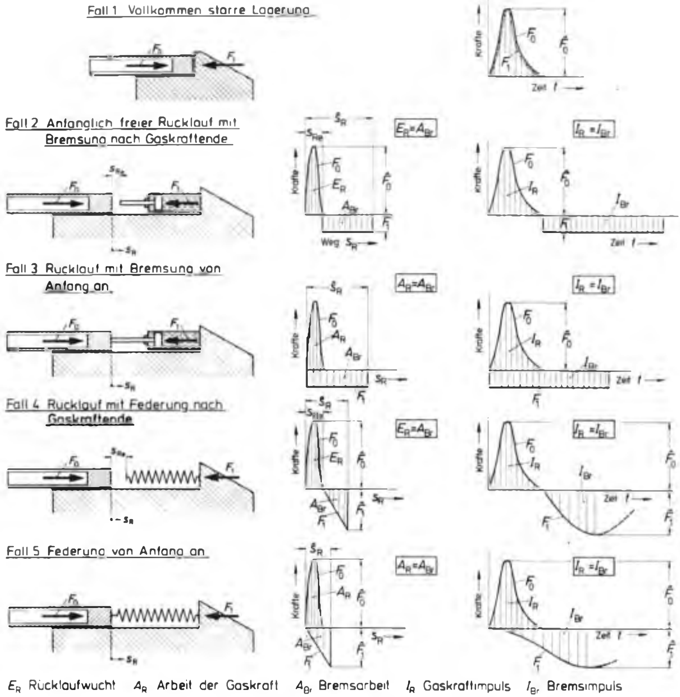


Bild 909. *Arten der Rohrlagerung (schematisch).*

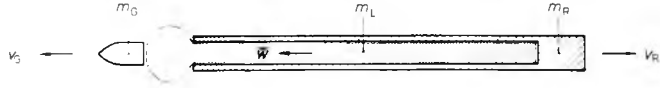
nun als Belastung der Lafette anstelle der Gasrückstoßkraft die Bremskraft in Erscheinung (s. 9.6.3 und 9.6.4), die entsprechend der Richtung, in der sie auf die Lafette wirkt, auch Bremsrückstoßkraft genannt wird. Bei entsprechend langem Bremsweg kann die Lafettenbelastung auf diese Weise gegenüber einer starren Lagerung des Rohres wesentlich herabgesetzt werden.

Als Sonderfall wird in Abschnitt 9.6.5 die Aufnahme der Rücklaufwucht durch eine Feder (Bild 909, Fall 4 und Fall 5) behandelt.

Als Grundlage für eine genauere Berechnung der Lafettenbelastung bei verschieblicher Rohrlagerung sind die Bewegungsverhältnisse bei freiem Rücklauf, also ohne jede Bremskraft, von Bedeutung.

9.6.2. Bewegungsverhältnisse bei freiem Rücklauf

Wenn sich das frei verschieblich gelagerte Rohr beim Schuß unter dem Einfluß der Gaskraft F_R nach rückwärts in Bewegung setzt, kann man die dabei erreichte maximale Rücklaufgeschwindigkeit auch ohne Kenntnis des genauen Gaskraftverlaufes sehr einfach aus einer Impulsbetrachtung berechnen, wobei nur die Gewichte, d. h. Massen, von Rohr, Geschoß und Ladung sowie die Mündungsgeschwindigkeit des Geschosses bekannt sein müssen.



m_G	Geschoßmasse	v_G	Geschoßgeschwindigkeit
m_L	Ladungsmasse	$\overline{w}$	Mittlere Geschwindigkeit der Pulvergase
m_R	Rücklaufmasse	v_R	Rücklaufgeschwindigkeit

Bild 910. *Massen und Geschwindigkeiten beim Schuß.*

Bild 910 zeigt schematisch das aus der Geschoßmasse m_G, der Masse der Ladung bzw. der Pulvergase m_L und der Masse des Rohres bzw. der rücklaufenden Teile m_R bestehende Massensystem in einem beliebigen Augenblick des Schußvorganges. Da sämtliche Gaskräfte und Reibungskräfte innere Kräfte sind, die sich paarweise aufheben, und da die Gewichtskräfte gegenüber den sehr viel größeren Massenkräften auch bei nicht horizontalem Schuß außer Betracht bleiben können, ist der Impuls der äußeren Kräfte gleich Null. Nach dem Impulssatz für ein Massensystem (s. 9.3, Gleichung (5)) gilt also für die Summe der Bewegungsgrößen

$$\Sigma\,(mv) = \text{const.}$$

bzw., da die Massen vor dem Schuß in Ruhe waren,

$$\Sigma\,(mv) = 0. \tag{23}$$

Bei entsprechender Vorzeichendefinition gilt:

Summe der nach rechts gerichteten Bewegungsgrößen
= Summe der nach links gerichteten Bewegungsgrößen.

In jedem Augenblick ist also (mit den Bezeichnungen von Bild 910)

$$m_R \cdot v_R = m_G \cdot v_G + m_L \overline{w} \tag{24}$$

oder mit den Bezeichnungen I_R, I_G und I_L für die Impulse von Rohr, Geschoß und Ladung

$$I_R = I_G + I_L. \tag{24a}$$

Die gesamte Bewegungsgröße der mit verschiedener Geschwindigkeit strömenden Pulvergasteilchen ergibt sich als Produkt der Ladung m_L mit der *mittleren* Strömungsgeschwindigkeit $\overline{w}$.

Bei *Geschoßaustritt* (Index a) gilt:

$$v_G = v_O,$$

am Geschoßboden

$$w = v_O,$$

am Rohrboden

$$w \approx 0$$

(wenn die gegenüber v_O kleine Rücklaufgeschwindigkeit vernachlässigt wird)

und somit $\overline{w} \approx v_O/2.$

Damit lautet Gleichung (24)

$$m_R v_{Ra} = m_G v_0 + m_L v_0/2. \tag{25}$$

Hieraus:
Rücklaufgeschwindigkeit bei Geschoßaustritt

$$\boxed{v_{Ra} = \frac{m_G + 0{,}5\, m_L}{m_R}\, v_0 .} \tag{26}$$

Am *Ende der Nachwirkung* der Pulvergase (Index e) gilt, da der Druck am Geschoßboden vor der Mündung rasch abfällt, unverändert

$$v_G = v_O.$$

Die mittlere Ausströmgeschwindigkeit $\overline{w}$ der Pulvergase aus der Rohrmündung, die für den Impuls der Pulvergase bei Gaskraftende $m_L \cdot \overline{w}$ maßgebend ist, kann nur durch sehr langwierige innenballistische Rechnungen, und zwar in Abhängigkeit von Art und Gewicht der Ladung, Seeleninhalt des Rohres, Mündungsgasdruck und v_O ermittelt werden. Erfahrungsgemäß gilt näherungsweise

$$\overline{w} \approx 1200 \text{ bis } 1400 \text{ m/s.} \tag{27}$$

Eine gute Näherung gibt auch die Formel

$$\overline{w} = \sqrt{v_O^2 + \overline{c}^2}\ , \tag{28}$$

wobei die mittlere Schallgeschwindigkeit der Pulvergase an der Rohrmündung näherungsweise $\overline{c} \approx 1000$ m/s gesetzt werden kann.

Nach Einführung eines Nachwirkungsbeiwertes β, der durch die Beziehung

$$\overline{w} = \beta v_0 \tag{29}$$

definiert ist, lautet die Impulsgleichung (24)

$$m_R v_{Re} = m_G v_0 + m_L \beta v_0 . \tag{30}$$

Hieraus:
Rücklaufgeschwindigkeit am Ende der Nachwirkung

$$\boxed{v_{Re} = \frac{m_G + \beta m_L}{m_R} v_0 .} \tag{31}$$

Näherungsweise kann nach Gleichung (27) als Nachwirkungsbeiwert

$$\beta \approx \frac{1200}{v_0} \text{ bis } \frac{1400}{v_0} \tag{32}$$

eingesetzt werden, wobei die untere Grenze für niedrige v_0 (unter 800 m/s), die obere Grenze für hohe v_0 (über 1200 m/s) gilt (Bild 911).

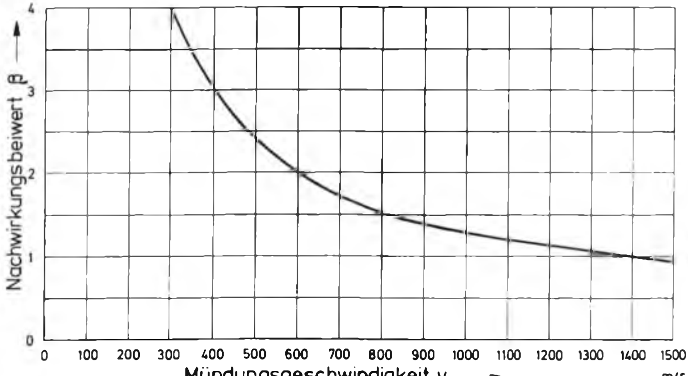


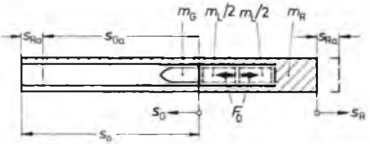
Bild 911. *Näherungsweise Ermittlung des Nachwirkungsbeiwertes.*

Der bis zum Ende der Gasdruckdauer zurückgelegte Rücklaufweg s_{Re} setzt sich zusammen aus dem Rücklaufweg bis Geschoßaustritt s_{Ra} und dem Rücklaufweg während der Nachwirkungsdauer s_{Rn}, d.h.

$$s_{Re} = s_{Ra} + s_{Rn} . \tag{33}$$

Rücklaufweg bis Geschoßaustritt s_{Ra}

Nach dem Impulssatz (s. 9.3) bleibt beim Fehlen äußerer Kräfte der gemeinsame Schwerpunkt von Geschoß und Rohr in Ruhe, wobei wie in Bild 908 je die halbe Ladungsmasse dem Geschoß und dem Rohr zuzuschlagen ist (Bild 912).



m_G Geschoßmasse
m_L Ladungsmasse
m_R Rücklaufmasse
F_0 Gaskraft
s_{Ga} Geschoßweg bei Geschoßaustritt
s_{Ra} Rücklaufweg bei Geschoßaustritt
s_o Geschoßweg relativ zum Rohr

Bild 912. *Geschoßweg s_G und Rücklaufweg s_R.*

Somit gilt

$$\frac{s_G}{s_R} = \frac{m_R + m_L/2}{m_G + m_L/2} \tag{34}$$

Aus Bild 912 ist für den Geschoßweg s_o relativ zum Rohr bei Geschoßaustritt abzulesen

$$s_o = s_{Ra} + s_{Ga} = s_{Ra} \left(1 + \frac{s_{Ga}}{s_{Ra}}\right). \tag{35}$$

Durch Einsetzen von Gleichung (34) erhält man

$$s_o = s_{Ra} \frac{(m_G + m_L/2) + (m_R + m_L/2)}{m_G + m_L/2}$$

oder

$$s_{Ra} = \frac{m_G + m_L/2}{m_R + m_G + m_L} \cdot s_o . \tag{36}$$

Rücklaufweg s_{Rn} während der Nachwirkungsdauer

Die Nachwirkungsdauer t_n kann aus dem Nachwirkungsimpuls I_n berechnet werden, wenn man nach Vallier näherungsweise annimmt, daß die Gaskraft F während der Nachwirkungsdauer linear mit der Zeit abnimmt. Nach Bild 914 gilt dann mit der Mündungsgaskraft F_a

$$I_n = F_a \cdot t_n/2. \tag{37}$$

Aus

$$I_n = m_R (v_{Re} - v_{Ra}) \tag{38}$$

folgt mit Gleichung (26) und (31)

$$I_n = (\beta - 0{,}5)\, m_L v_0 \tag{39}$$

und, nach Einsetzen in Gleichung (37),

$$t_n = \frac{(\beta - 0{,}5)\, m_L v_0}{F_a/2}. \tag{40}$$

Obwohl der Geschwindigkeitsverlauf während der Nachwirkungsdauer nicht linear ist, kann man mit guter Näherung

$$s_{Rn} \approx \frac{v_{Ra} + v_{Re}}{2}\, t_n \tag{41}$$

setzen.

Einen genaueren Wert für den Rücklaufweg erhält man mit der Annahme von Vallier über den Gaskraftverlauf, indem man die aus der Gaskraft berechnete Beschleunigung zweimal integriert. Damit wird

$$s_{Rn} = \left(\frac{v_{Ra} + v_{Re}}{2} + \frac{v_{Re} - v_{Ra}}{6}\right) t_n. \tag{42}$$

Beispiel: 105-mm-Haubitze (wie Seite 389)

Gegeben:

$v_0 = 630$ m/s
$m_G = 15{,}0$ kg
$m_L = 3{,}0$ kg
$m_R = 750$ kg
$s_0 = 2{,}600$ m

Mündungsgasdruck

$$p_a = 730 \text{ bar} = 73 \text{ N/mm}^2$$

Berechnet:

Nachwirkungsbeiwert

$$\beta \approx \frac{1200}{630} = 1{,}9$$

Rücklaufgeschwindigkeit bei Geschoßaustritt

$$v_{Ra} = \frac{15 + 0{,}5 \cdot 3{,}0}{750}\, 630 = 13{,}9 \text{ m/s}$$

Rücklaufgeschwindigkeit bei Gaskraftende

$$v_{Re} = \frac{15 + 1{,}9 \cdot 3{,}0}{750}\, 630 = 17{,}4 \text{ m/s}$$

Mündungsgaskraft

$$F_a = 73 \cdot 8880 = 648000 \text{ N} = 648 \text{ kN}$$

Geschoßdurchlaufzeit

$$t_a \approx \frac{2\,s_o}{v_o} = \frac{2 \cdot 2{,}6}{630} \approx 8{,}3 \cdot 10^{-3}\,s$$

oder genauer aus innenballistischen Berechnungen

$$t_a = 9{,}3 \cdot 10^{-3}\,s$$

Nachwirkungsdauer

$$t_n = \frac{(1{,}9 - 0{,}5)\,3{,}0 \cdot 630}{648000/2} = 8{,}2 \cdot 10^{-3}\,s$$

Gasdruckdauer

$$t_e = t_a + t_n = (9{,}3 + 8{,}2) \cdot 10^{-3} = 17{,}5 \cdot 10^{-3}\,s$$

Rücklaufweg bis Geschoßaustritt

$$s_{Ra} = \frac{15 + 1{,}5}{750 + 15 + 3} \cdot 2{,}6 = 0{,}056\ m$$

Rücklaufweg während Nachwirkung

$$s_{Rn} = \left(\frac{13{,}9 + 17{,}4}{2} + \frac{17{,}4 - 13{,}9}{6}\right) \cdot 8{,}2 \cdot 10^{-3} = 0{,}133\ m$$

Gesamter Rücklaufweg bis Ende Nachwirkung bei freiem Rücklauf

$$s_{Re} = 0{,}056 + 0{,}133 \doteq 0{,}189\ m$$

9.6.3. **Erforderliche Bremskraft bei anfänglich freiem Rücklauf** (Bild 909, Fall 2)

Es sei zunächst angenommen, daß das Rohr bis Gaskraftende frei zurückläuft und erst dann aus der bis dahin erreichten Rücklaufgeschwindigkeit durch eine Rücklaufbremseinrichtung bis zum Stillstand abgebremst wird. Praktisch hätte dieses Verfahren, das erfordert, daß bei erheblicher Rücklaufgeschwindigkeit plötzlich eine Bremskraft einsetzt, allerdings erhebliche Nachteile. Es wird deshalb im Geschützbau nicht angewendet. Da jedoch die Berechnung von Fall 2 die Grundlage für die Berechnung des praktisch wichtigen Falles 3 (s. 9.6.4) darstellt, soll damit begonnen werden.

Die Größe der erforderlichen Bremskraft kann entweder abhängig von der Zeit aus einer Impulsgleichung (s. 9.6.4) oder abhängig vom Rücklaufweg aus einer Energiegleichung berechnet werden. Letztere Methode ist praktisch vorrangig, da hydraulische Rohrbremsen im

allgemeinen wegabhängig gesteuert werden und da der größte Rücklaufweg eine wichtige konstruktive Größe ist.

Aus der größten Rücklaufgeschwindigkeit v_{Re} nach Gleichung (31) erhält man die bei Gaskraftende erreichte Rücklaufwucht bei freiem Rücklauf

$$E_{Ro} = \frac{m_R}{2} v_{Re}^2 = \frac{(m_G + \beta m_L) v_0^2}{2} \cdot \frac{m_G + \beta m_L}{m_R}. \qquad (43)$$

Die Rücklaufwucht ist also in etwa gleich der mit dem Verhältnis m_G/m_R multiplizierten Mündungswucht $m_G v_0^2/2$, wobei genauer an Stelle des Geschoßgewichtes m_G der Wert $m_G + \beta m_L$ einzusetzen ist. Durch Vergrößerung des Gewichtes m_R der rücklaufenden Teile kann die Rücklaufwucht verringert werden.[1] Umgekehrt hat eine Erleichterung des Rohres durch Verwendung höherwertiger Werkstoffe zur Folge, daß die Rücklaufwucht und damit die Belastung der Lafette ansteigt. Es hängt von der Bauart und den Leistungen des Geschützes ab, welches Rohrgewicht die optimalen Verhältnisse ergibt.

Die Bremsarbeit A_{Br}, die in den Kraft-Weg-Diagrammen von Bild 913 durch die schraffierte Fläche dargestellt wird, ist gleich der Rücklaufwucht E_{Ro}. Bei gegebenem Bremsweg s_{Br} ist die Belastung der Lafette $\hat{F}_1$ am geringsten bei konstanter Bremskraft. Zum Vergleich sind Diagramme für die Aufnahme der Rücklaufwucht durch eine Feder (s. auch Bild 909, Fall 4) beigefügt.

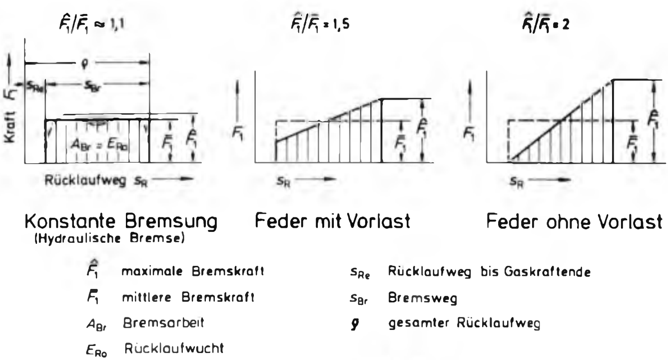


Bild 913. *Ungleichförmigkeitsgrad $\hat{F}_1/\bar{F}_1$ bei hydraulischer Bremsung und bei Federung.*

---

[1] Dieses Verfahren wurde z.B. bei Marinegeschützen angewandt; vgl. Kap. 8, Geschütze, Bild 887.

Die maximale Lafettenbelastung $\hat{F}_1$ hängt vom Ungleichförmigkeitsgrad $\hat{F}_1/\bar{F}_1$ des Arbeitsdiagrammes ab, der am ungünstigsten bei einer Feder ohne Vorlast ist.
Ein hydraulisches Bremsdiagramm läßt sich, wie in Bild 913 durch die gestrichelte Linie angedeutet ist, nahe an den Rechteckverlauf annähern.

Mit der üblichen Bezeichnung K für die Bremskraft gilt praktisch für hydraulische Rücklaufeinrichtungen

$$\hat{K}/\bar{K} = 1{,}1 \text{ bis } 1{,}2. \tag{44}$$

Aus $E_{Ro} = K \cdot s_{Br}$

folgt:

Mittlere Bremskraft
$$\boxed{\bar{K} = \frac{E_{Ro}}{s_{Br}}} \tag{45}$$

Bremsweg
$$\boxed{s_{Br} = \frac{E_{Ro}}{\bar{K}}} \tag{46}$$

Der gesamte Rücklaufweg ist somit

$$\rho = s_{Re} + s_{Br}. \tag{47}$$

Beispiel:

Für die bereits auf den Seiten 389 und 396 behandelte 105-mm-Haubitze erhält man die Rücklaufwucht

$$E_{Ro} = \frac{m_R}{2} \cdot v_{Re}^2 = \frac{750}{2} \cdot 17{,}4^2 = 114000 \text{ Nm} = 114 \text{ kNm}$$

und für einen gegebenen Bremsweg $s_{Br} = 1{,}0$ m die mittlere Bremskraft

$$\bar{K} = \frac{114}{1{,}0} = 114 \text{ kN}.$$

Der gesamte Rücklaufweg ist

$$\rho = 0{,}189 + 1{,}0 = 1{,}189 \text{ m}.$$

Eine für das vorliegende Beispiel durchgeführte Energiebilanz soll zeigen, welche Bedeutung bei Geschützen üblicher Bauart den einzelnen Energieanteilen zukommt:

Mündungswucht

$$E_{Go} = \frac{m_G}{2} \cdot v_o^2 = \frac{15}{2} \cdot 630^2 \approx 2980000 \text{ Nm} = 2980 \text{ kNm}.$$

Die Rücklaufwucht E_{Ro} beträgt also nur 3,8% der Mündungswucht.

Wucht der Pulvergase bei Gaskraftende

$$E_{Le} \approx \frac{m_L}{2} \cdot \bar{w}^2 = \frac{3}{2} \cdot 1\,200^2 \approx 2\,160\,000 \text{ Nm} = 2\,160 \text{ kNm}.$$

Das Beispiel ergibt somit folgende Energiebilanz:

Gesamte mechanische Energie, d.h. Gesamtwucht von Geschoß, Ladung und Rohr

$$E_{Go} + E_{Le} + E_{Ro} \approx 5250 \text{ kNm}.$$

Davon entfallen auf das Geschoß	(E_{Go})	57 %,
auf die Pulvergase	(E_{Le})	41 %,
auf den Rohrrücklauf	(E_{Ro})	2 %.

Die Rotationsenergie des Geschosses ist demgegenüber vernachlässigbar klein (<0,6 %).

Die gesamte mechanische Energie ist nur ein Teil (40 bis 50 %) der chemischen Energie des Pulvers, da ein erheblicher Energieanteil als Wärme von den Pulvergasen abgeführt oder auf Rohr und Patronenhülse übertragen wird.

9.6.4. Einfluß einer Anfangsbremsung auf den Rohrrücklauf (Bild 909, Fall 3)

Während bei den Berechnungen des vorigen Abschnittes vorausgesetzt wurde, daß die Bremskraft erst nach Gaskraftende einsetzt, soll nun der Einfluß eines früheren Bremsbeginns untersucht werden. Dabei wird eine bereits ab Gaskraftbeginn wirkende Bremsung als Anfangsbremsung bezeichnet.

Da jeweils bis zum Ende des Rohrrücklaufs der positive Beschleunigungsantrieb I_{Re} der Gaskraft durch den negativen Bremsantrieb I_{Br} (s. Bild 914) aufgezehrt sein muß, gilt unabhängig vom Zeitpunkt des Einsetzens der als konstant angenommenen Bremskraft K

$$I_{Re} = I_{Br} = K \cdot t_{Br}. \tag{48}$$

Die Bremsdauer

$$t_{Br} = \frac{I_{Re}}{K} \tag{49}$$

ist somit unabhängig vom Bremsbeginn. Unterschiedlich ist jedoch, wie aus Bild 914 zu entnehmen ist, die maximale Rücklaufgeschwindigkeit v_R, die sich im Fall a aus dem gesamten Gaskraftantrieb I_{Re} als

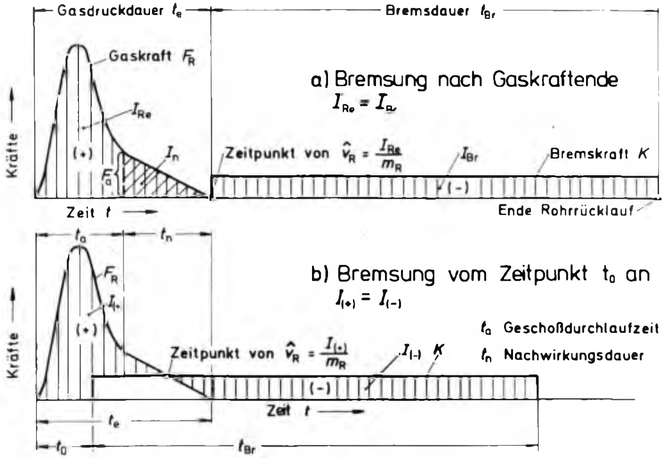


Bild 914. *Zeitlicher Verlauf der Kräfte am Rohr.*

$$\hat{v}_R = \frac{I_{Re}}{m_R}$$

ergibt, im Fall b aber nur durch die oberhalb des negativen Bremsantriebes liegende positive Diagrammfläche $I_{(+)}$ bestimmt ist, und somit durch einen früheren Bremsbeginn vermindert wird.

Der unterschiedliche Geschwindigkeitsverlauf in den Fällen a und b hat zur Folge, daß trotz gleicher Bremsdauer die Rücklaufwege verschieden groß sind. Der Einfluß des Zeitpunktes des Bremsbeginns auf die Größe des gesamten Rücklaufweges kann verhältnismäßig einfach durch Überlagerung von zwei Bewegungsvorgängen berechnet werden.

Wenn, wie in Bild 914a schematisch dargestellt ist, das frei bewegliche Rohr allein durch die Gaskraft $F_R = f(t)$ belastet wird, wird dadurch ein erster Bewegungsvorgang mit der Beschleunigung a_F der Geschwindigkeit v_F und dem Weg s_F eingeleitet (siehe Gleichungen (50)).

Bei Belastung allein durch die Bremskraft K entstehen nach den Gleichungen (51) die Beschleunigung a_K, die Geschwindigkeit v_K und der Weg s_K.

Bei Überlagerung beider Belastungen gewinnt man durch Addition der Gleichungen (50) und (51) die in den Gleichungen (52) zusammengestellten Beziehungen für die resultierende Beschleunigung a_R, für die resultierende Geschwindigkeit v_R und für den gesamten Rücklaufweg ρ.

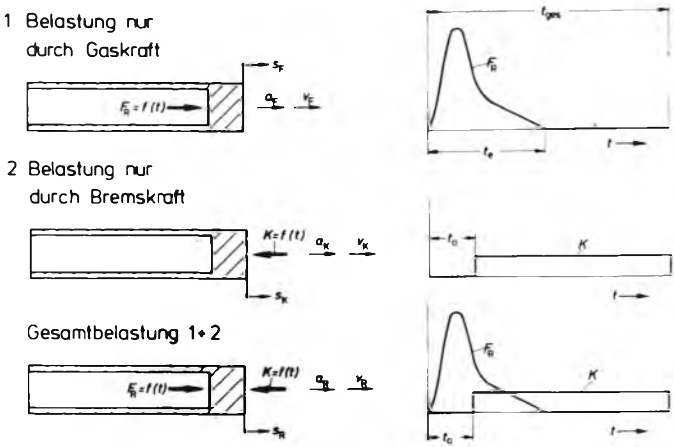


Bild 914a. *Berechnung des Rücklaufweges durch Überlagerung.*

	Beschleunigung	Geschwindigkeit	Gesamtweg	
1	$a_F = \frac{F_R}{m_R} = f(t)$	$v_F = \int_0^t a_F \, dt = f(t)$	$s_F = \int_0^{t_{ges}} v_F \, dt$	(50)
2	$a_K = -\frac{K}{m_R} = f(t)$	$v_K = \int_0^t a_K \, dt = f(t)$	$s_K = \int_0^{t_{ges}} v_K \, dt$	(51)
1 + 2	$a_R = \frac{F_R - K}{m_R}$ $= a_F + a_K$	$v_R = \int_0^t a_R \, dt$ $= v_F + v_K$	$\rho = \int_0^{t_{ges}} v_R \, dt$ $= s_F + s_K$	(52)

Man erhält also den gesamten Rücklaufweg ρ, indem man den Einzelweg s_F bis zum Ende der Bremszeit so berechnet, als ob nur die Gaskraft F_R wirken würde, und den Einzelweg s_K so, als ob bis zum selben Zeitpunkt nur die Bremskraft K vorhanden wäre.

s_F setzt sich aus dem Weg s_{Fe} bis zum Ende der Gasdruckdauer und einem Weg bis zum Ende der Bremszeit, der mit der Geschwindigkeit v_{Re} nach Gleichung (31) zurückgelegt wird, zusammen. Dabei gilt

$$s_{Fe} = s_{Re} = s_{Ra} + s_{Rn}$$

nach Gleichung (33).

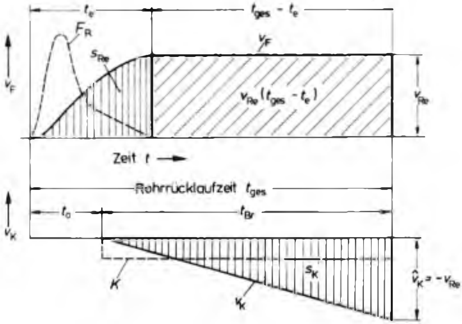


Bild 914b. *Ermittlung der Wege s_F und s_K aus den Geschwindigkeitsdiagrammen.*

In den Geschwindigkeitsdiagrammen von Bild 914b erscheinen die Teilwege s_F und s_K als Diagrammflächen, wobei nur der Teilweg

$$s_F = s_{Re} + v_{Re}(t_{ges} - t_e)$$

$$= s_{Re} + v_{Re} \cdot t_{Br} - v_{Re}(t_e - t_0)$$

vom Zeitpunkt des Bremsbeginns t_0 abhängt, während der Teilweg s_K bei gegebener Bremskraft K unabhängig vom Bremsbeginn ist.

Für den gesamten Rücklaufweg

$$\rho = s_F + s_K = s_{Re} + v_{Re} \cdot t_{Br} + s_K - v_{Re}(t_e - t_0)$$

gilt im Sonderfall der Bremsung nach Gaskraftende mit $t_0 = t_e$

$$\rho_0 = s_{Re} + v_{Re} \cdot t_{Br} + s_K. \quad (53)$$

Für beliebigen Bremsbeginn ergibt sich damit

$$\rho = \rho_0 - v_{Re}(t_e - t_0) = \rho_0 - \Delta_\rho. \quad (54)$$

Die Verkürzung des Rücklaufweges

$$\Delta_\rho = v_{Re}(t_e - t_0) \quad (55)$$

beträgt bei Bremsung ab Gaskraftbeginn mit $t_0 = 0$

$$\Delta_{\rho A} = v_{Re} \cdot t_e, \quad (56)$$

bei Bremsung ab Geschoßaustritt mit $t_0 = t_a$

$$\Delta_{\rho B} = v_{Re}(t_e - t_a) = v_{Re} \cdot t_n. \quad (57)$$

Statt einer Verkürzung des Rücklaufweges bei unveränderter Bremskraft kann der Einfluß der Anfangsbremsung dafür ausgenutzt werden, bei unverändertem Rücklaufweg die Bremskraft herabzusetzen. Mit Rücksicht auf ein möglichst geringes Gewicht oder eine raumsparende Ausführung der Lafette verzichtet man daher nicht gerne auf eine Anfangsbremsung, obwohl anderseits ein anfänglich freier Rücklauf folgende Vorteile bringt:

Verringerung der Lafettenschwingung bis Geschoßaustritt,
Verringerung des dadurch verursachten Abgangsfehlerwinkels,

Verbesserung der Stabilität bei Feldlafetten, weil das Moment der Bremskraft K erst nach Wegfallen des Kräftepaares $F_R \cdot d$ einsetzt (s. Abschnitt 9.9).

Der gesamte Rücklaufweg ρ_0 bei Bremsung nach Gaskraftende wird vorteilhaft nicht nach Gleichung (53) berechnet, sondern wie in Abschnitt 9.6.3 mit Benutzung der Gleichungen (46) und (47) aus

$$\rho_0 = s_{Re} + \frac{E_{Ro}}{K} . \qquad (58)$$

Beispiel: 105-mm-Haubitze (wie Seite 399)

Bremskraft $\overline{K} = 114$ kN

Rücklaufweg mit Bremsung ab Gaskraftende

$$\rho_0 = 1{,}189 \text{ m}$$

Verkürzung des Rücklaufweges durch Bremsung ab Gaskraftbeginn

$$\Delta\rho_A = 17{,}4 \cdot 17{,}5 \cdot 10^{-3} = 0{,}305 \text{ m}$$

Verkürzung des Rücklaufweges durch Bremsung ab Geschoßaustritt

$$\Delta\rho_B = 17{,}4 \cdot 8{,}2 \cdot 10^{-3} = 0{,}143 \text{ m}$$

Rücklaufweg mit Anfangsbremsung

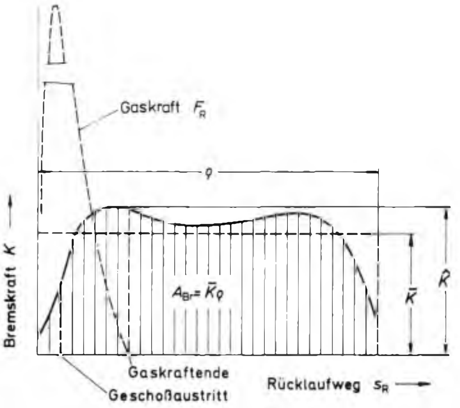
$$\rho_A = 1{,}189 - 0{,}305 = 0{,}884 \text{ m}$$

Rücklaufweg mit Bremsung ab Geschoßaustritt

$$\rho_B = 1{,}189 - 0{,}143 = 1{,}046 \text{ m}$$

Das Beispiel zeigt den beträchtlichen Einfluß einer Anfangsbremsung.

Bei ausgeführten Rohrbremsen steigt die hydraulische Bremskraft nicht sprunghaft, sondern während einer Übergangszeit, die sich über einen Teil der Gasdruckdauer erstreckt, allmählich auf ihren vollen Wert an (Bild 915). Der gesamte Rücklaufweg liegt dann zwischen den Werten



$\hat{K}$ maximale Bremskraft $\quad$ ρ gesamter Rücklaufweg

$\bar{K}$ mittlere Bremskraft $\quad$ A_{Br} Bremsarbeit

Bild 915. *Bremskraftdiagramm.*

mit voller Anfangsbremsung und *ohne* Anfangsbremsung, d.h. in obigem Beispiel zwischen 0,884 und 1,189 m.

Für Projektrechnungen genügt die Näherungsformel

$$\boxed{\rho = \frac{E_{Ro}}{\bar{K}},} \tag{59}$$

die für obiges Beispiel

$$\rho = \frac{114\ \text{kNm}}{114\ \text{kN}} = 1{,}000\ \text{m liefert.}$$

Zu beachten ist, daß nach Gleichung (59) die Bremsarbeit $A_{Br} = \bar{K} \cdot \rho$ gleich der Rücklaufwucht E_{Ro} bei *freiem* Rücklauf gesetzt wird. Nun ist zwar in jedem Fall die Bremsarbeit gleich der Arbeit der Gaskraft

$$A_R = \int F_R \, d s_R,$$

diese Arbeit ist jedoch im Gegensatz zum Gaskraftimpuls I_{Re} (s. Gleichung (48)) nicht unabhängig vom Bewegungsablauf, sondern wird durch die mit einer Anfangsbremsung verbundene Verkleinerung der Wege s_R herabgesetzt. Nur bei anfänglich freiem Rücklauf gilt $A_R = E_{Ro}$. Mit E_{Ro} wird also in Gleichung (59) ein etwas zu großer Betrag eingesetzt, so daß man mit ρ auf der sicheren Seite liegt.

Entsprechend liefert die Näherungsformel für die mittlere Bremskraft

$$\boxed{\overline{K} = \frac{E_{Ro}}{\rho}} \qquad (60)$$

einen Wert, der noch einen kleinen Sicherheitszuschlag einschließt.

Die maximale Bremskraft $\hat{K}$ ist entsprechend dem Ungleichförmigkeitsgrad der Bremsung größer als der Mittelwert $\overline{K}$. Man rechnet, wie bei 9.6.3, Gleichung (44), angegeben ist, mit

$$\hat{K}/\overline{K} \approx 1{,}1 \text{ bis } 1{,}2.$$

9.6.5. Lafettenbelastung bei federnder Rohrlagerung
(Bild 909, Fälle 4 und 5)

Es wird in manchen Fällen versucht, die kurzzeitige hohe Belastung eines Waffenrohres oder sonstiger Waffenteile durch zwischengeschaltete Federn von der Lafette fernzuhalten oder wenigstens in der Wirkung auf die Lafette abzumindern. Dieses Verfahren kann jedoch nur unter bestimmten Bedingungen zum Erfolg führen. Im folgenden werden die Grenzen für die Anwendung einer Federung von Waffenrohren aufgezeigt.

Unter der Voraussetzung, daß die rücklaufenden Massen nach anfänglich freiem Rücklauf erst *nach Gaskraftende* auf die Feder stoßen (Fall 4 in Bild 909), muß die gesamte freie Rücklaufwucht E_{Ro} nach Gleichung (43) in potentielle Federenergie umgewandelt werden. Wie bereits an Hand von Bild 913 für eine Feder mit linearer Kennlinie gezeigt wurde, ist dabei die Lafettenbelastung bei gleichem Rücklaufweg erheblich ungünstiger als bei hydraulischer Bremsung mit konstanter Bremskraft.

Ebenso wie bei der hydraulischen Bremsung ist es wesentlich vorteilhafter, wenn die Federkraft bereits *von Beginn der Gaskraft an* wirksam ist (Fall 5 in Bild 909), so daß nur dieser Fall praktisch in Frage kommt.

Da die vollständige Ableitung der Berechnungsformeln zu langwierig ist, werden im folgenden die Zusammenhänge nur grundsätzlich angedeutet, wobei der Einfluß der bei hoher Belastungsgeschwindigkeit in Federn auftretenden Stoßwellen vernachlässigt wird.

Im einfachen Fall eines Rechteckimpulses auf eine gefederte Masse (Bild 916, Fall A) lassen sich die Verhältnisse ohne Rechnung übersehen. Solange die plötzlich einsetzende Kraft F_O wirkt, führt die Masse unter dem Einfluß der Feder mit der Federsteife c eine Schwingung um die neue Gleichgewichtslage mit der Wegkoordinate $s_0 = \frac{F_0}{c}$ aus. Die Kraft am Widerlager ist $F_l = c \cdot s$.

Wie das Kraft-Zeit-Diagramm zeigt, wird während der Wirkdauer t_e der Höchstwert

$$\hat{F}_1 = 2\,F_O$$

erreicht, wenn die halbe Eigenschwingungsdauer des Systems

$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{c}}$ kleiner ist als die Wirkdauer von F_O, d.h. wenn

$$\frac{T}{2} < t_e\,,$$

entsprechend einer harten Feder mit großer Federsteife c.

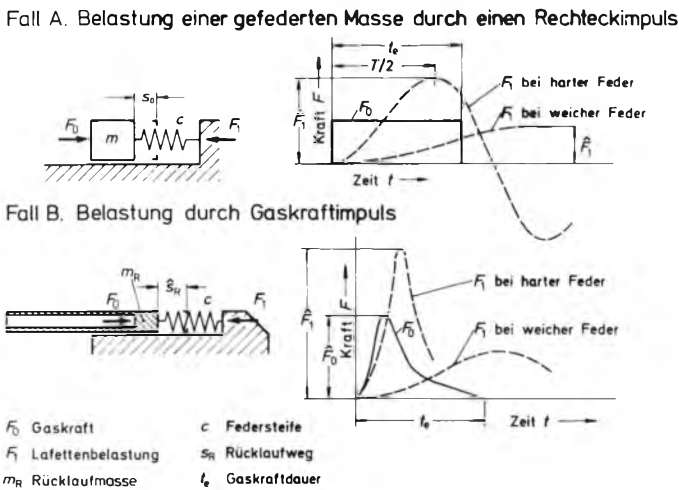


Bild 916. *Lafettenbelastung bei federnder Rohrlagerung.*

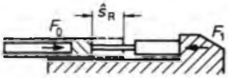
Im Fall $\frac{T}{2} > t_e$ (weiche Feder) hört der Impuls vor Erreichen des Höchstwertes $\hat{F}_1$ auf und es gilt

$$\hat{F}_1 < 2\,F_O.$$

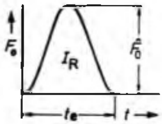
Nur bei entsprechend weicher Federung kann $\hat{F}_1$ unter die Größe der Belastung F_O gesenkt werden.

Grundsätzlich ähnliche Verhältnisse ergeben sich bei Belastung einer Rücklaufmasse durch einen Gaskraftimpuls (Bild 916, Fall B), der im wesentlichen gekennzeichnet ist durch die maximale Gaskraft $\hat{F}_O$ und

durch die Gaskraftdauer t_e. Ähnlich wie im Fall des Rechteckimpulses hängt das Verhältnis $\hat{F}_1/\hat{F}_0$ davon ab, wie sich die Eigenschwingungsdauer der gefederten Masse zur Belastungsdauer t_e verhält. Wenn man den Gaskraftverlauf näherungsweise durch eine einfache mathematische Funktion, z.B. durch eine Sinusfunktion, darstellt, läßt sich nach Lösung der Differentialgleichung des Schwingungsvorganges die Höchstbelastung $\hat{F}_1$ für beliebige Werte der Rücklaufmasse m_R und der Federsteife c berechnen.



Annahme: $F_0 = \frac{\hat{F}_0}{2}\left(1 - \cos\frac{2\pi}{t_e}t\right)$



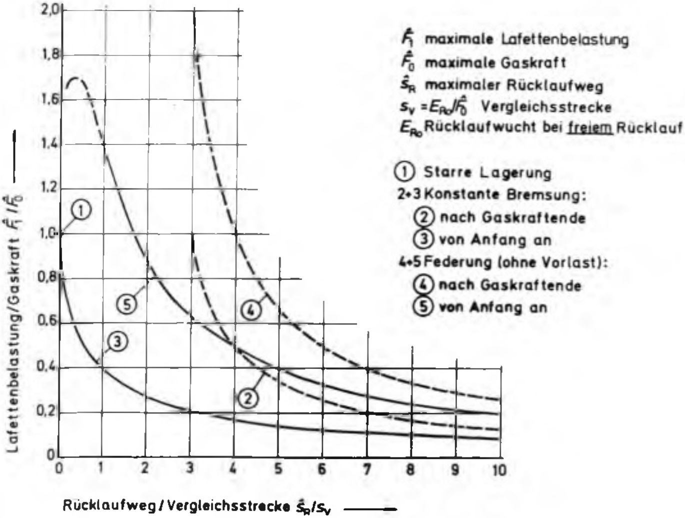


Bild 917. *Lafettenbelastung abhängig vom Federweg bzw. Bremsweg.*

Für die praktische Ausführbarkeit einer Federung ist vor allem der maximale Federweg $\hat{s}_R$ maßgebend. Deshalb ist in Bild 917 $\hat{F}_1/\hat{F}_0$ nicht, wie sonst üblich, abhängig von der Eigenfrequenz des schwingenden Systems, sondern abhängig vom maximalen Federweg $\hat{s}_R$ in relativem Maßstab, d.h. abhängig von $\hat{s}_R/s_v$ angetragen, wobei s_v eine Vergleichsstrecke ist.

Die für den Fall 5 (von Anfang an wirkende Federkraft) berechnete Kurve 5 ist für beliebige Gaskraftimpulse, rücklaufende Massen und Federungen mit linearer Kennlinie (ohne Vorlast) gültig, wenn die Vergleichsstrecke s_V gleich

$$s_V = E_{Ro}/\hat{F}_o \tag{61}$$

gesetzt wird. Dabei bedeutet E_{Ro} die Rücklaufwucht bei freiem Rücklauf und $\hat{F}_o$ die maximale Gaskraft. s_V ist also eine von der gewählten Rohrlagerung unabhängige Größe, die nach Gleichung (43) nur von ballistischen Daten und vom Gewicht der Rücklaufmasse abhängt.

Beispielsweise nimmt s_V bei üblichen Rohrwaffen folgende Werte an:

90 mm Kanone	s_V = 37 mm
105 mm Kanone	s_V = 43 mm
105 mm Haubitze	s_V = 50 mm
81 mm Mörser	s_V = 166 mm
120 mm Mörser	s_V = 73 mm
Infanteriegewehr (starr verriegelt)	s_V = 1,5 mm

Die hohen Werte bei den Mörsern sind auf das verhältnismäßig geringe Rohrgewicht zurückzuführen. Umgekehrt erklärt sich der geringe Wert beim Infanteriegewehr aus einem großen Verhältnis Rücklaufgewicht/Geschoßgewicht.

Der Verlauf der für Fall 5 der Rohrlagerung gültigen Kurve 5 in Bild 917 zeigt, daß bis zu einem Wegverhältnis $\hat{s}_R/s_V$ = 1,75 das Kraftverhältnis $\hat{F}_l/\hat{F}_o$ größer als Eins ist. Das bedeutet, daß eine Federung mit einem Federweg $\hat{s}_R < 1{,}75\ s_V$ zwecklos, ja sogar schädlich ist. Eine Senkung der Lafettenbelastung um wenigstens 50 % wird erst bei einem Federweg $\hat{s}_R = 4\ s_V$ erreicht. Bei üblichen Kanonen- und Haubitzenrohren wäre das ein Federweg von 150 bis 200 mm, beim 81-mm-Mörserrohr sogar ein Weg von 580 mm.

Günstiger liegen die Verhältnisse beim Infanteriegewehr, das sich ja tatsächlich beim Schuß gegen die zurückfedernde Schulter des Schützen abstützt. Bei einem Federweg von 30 s_V = 45 mm ermäßigt sich die Belastung der Schulter auf rd. 7% der maximalen Gaskraft, d. h. auf etwa 1000 N.

In manchen Fällen kann das Verhältnis $\hat{s}_R/s_V$ durch Erhöhung des Rücklaufgewichtes in einen günstigeren Bereich verschoben werden. Wenn zum Beispiel ein 81 mm Mörser, dessen Rohrgewicht nur 12 kg beträgt, federnd auf einem Fahrzeug eingebaut werden soll, kann durch ein Zusatzgewicht von 200 kg das Rücklaufgewicht auf 212 kg erhöht und die Vergleichsstrecke s_V auf 9 mm verkleinert werden, so daß mit

einem Federweg von 4 s_V = 36 mm bereits eine wirksame Verminderung der Fahrzeugbelastung beim Schuß zu erreichen ist.

In Bild 917 sind zum Vergleich auch die Kurven der Lafettenbelastung für die übrigen in Bild 909 zusammengestellten Fälle der Rohrlagerung eingetragen. Auch bei den Fällen 2, 3 und 4 erlaubt die Einführung der Vergleichsstrecke $s_V = E_{Ro}/F_o$ eine allgemein gültige Darstellung der Lafettenbelastung in Abhängigkeit vom Rücklaufweg. Dem Bild ist anschaulich zu entnehmen, daß für einen bestimmten Rücklaufweg, zum Beispiel $\hat{s}_R/s_V$ = 8, die konstante, möglichst frühzeitig einsetzende Bremsung (Fall 3) die weitaus niedrigste Lafettenbelastung ergibt.

Die eingetragenen Kurven stellen Grenzfälle dar. Für zwischenliegende Verhältnisse ist zu interpolieren. Beispielsweise liegen die Werte für eine während der Gasdruckdauer ansteigende Bremskraft zwischen den Kurven 2 und 3, die Werte für eine Federung mit Vorspannkraft zwischen den Kurven 5 und 3.

Einfluß einer Federdämpfung:

Eine ungedämpfte Feder wäre zur Abfederung eines Rohres praktisch nicht geeignet, da die gesamte Rücklaufwucht wieder in Vorlaufwucht umgewandelt würde. Bei Gummifedern und bei Tellerfedern mit Mehrfachschichtung werden bis zu 30 %, bei Ringfedern etwa 67 % der Federarbeit in Wärme umgewandelt.

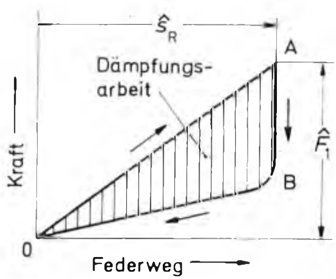


Bild 918. *Arbeitsdiagramm einer Reibungsfeder (Ringfeder).*

Für die Rücklaufberechnung ist eine Federsteife entsprechend dem Ast OA des Arbeitsdiagramms der gedämpften Feder (Bild 918) zugrunde zu legen. Dadurch wird die während des Rücklaufs geleistete Dämpfungsarbeit bereits berücksichtigt.

In einer hydraulischen Bremse wird beim Rücklauf die gesamte aufgenommene Arbeit in Wärme umgesetzt. Zum anschließenden Vorholen des Rohres in die Schußstellung ist deshalb neben der Bremse ein Vorholer erforderlich, der einen Teil der Rücklaufwucht als potentielle Energie speichert (s. 9.11.3).

9.6.6. Starre Lagerung des Rohres

Praktisch wird die starre Rohrlagerung nur bei Mörsern angewendet, bei denen die Gaskraft F_O über eine starre Bodenplatte steil nach unten auf den Boden übertragen wird (Bild 919).

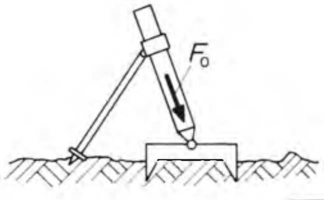


Bild 919. *Starre Rohrlagerung beim Mörser.*

Beispiele: 81 mm Mörser mit $\hat{F}_O$ = 412 kN,
120 mm Mörser mit $\hat{F}_O$ = 1620 kN.

Bei der starren Lagerung des Rohres in einer Lafette ist noch zu bedenken, daß nur bei *vollkommen* starrer Lagerung die Lafettenbelastung $\hat{F}_l$ gleich der Gaskraft $\hat{F}_O$ ist, während bei einer, wenn auch nur geringen, elastischen Nachgiebigkeit die Lafettenbelastung entsprechend Kurve 5 in Bild 917 erheblich darüber hinausgeht. Beispielsweise genügt bereits eine Nachgiebigkeit von $0{,}2\,s_V$, d.h. bei Geschützrohren mittleren Kalibers von etwa 10 mm, um $\hat{F}_l$ auf $1{,}6\,\hat{F}_O$ anwachsen zu lassen.

Die Verhältnisse sind wesentlich anders, wenn das Rohr zwar in der Lafette starr gelagert ist, diese aber frei bzw. längs eines gewissen Rücklaufweges gebremst zurücklaufen kann (Bild 920). Nach dieser Methode wurden die Geschütze vor Erfindung der hydraulischen Rohrbremsen konstruiert. Nachdem diese Konstruktion neuerdings wieder für Sonderfälle in Betracht gezogen wurde, sei sie hier erwähnt.

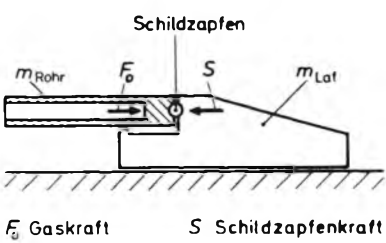


Bild 920. *Starre Rohrlagerung mit Lafettenrücklauf.*

Da beim Schuß die Beschleunigung der Lafette $a_{Laf} = S/m_{Laf}$ gleich der Beschleunigung des Gesamtgerätes

$$a_{ges} = F_0/(m_{Rohr} + m_{Laf})$$

ist, gilt für die am Schildzapfen übertragene Kraft

$$\hat{S} = \hat{F}_0 \frac{m_{Laf}}{m_{Rohr} + m_{Laf}} . \qquad (62)$$

Die Rücklaufwucht des Gerätes erhält man, wenn man in Gleichung (43) als Rücklaufmasse

$$m_R = m_{Rohr} + m_{Laf}$$

einsetzt.

Lagert man ein Rohr starr in einem verhältnismäßig schweren Fahrzeugkasten (Panzer), der auf den Fahrzeugfedern ausweichen kann, so erhält man für die Rücklaufwucht E_{Ro} und für die Vergleichsstrecke s_V, die für die Belastung der Federn maßgebend ist, recht günstige Werte.

Die erheblichen konstruktiven und bedienungsmäßigen Nachteile eines solchen Gerätes sollen hier nicht näher behandelt werden.

Beispiel: 105-mm-Haubitzenrohr nach Seite 389 und 399

gelagert in einem 10 t schweren Fahrzeugkasten.

Schildzapfenkraft $\hat{S} = 2310 \frac{10\,000}{10\,750} = 2\,150$ kN

Die für das Haubitzenrohr allein auf S. 399 berechnete Rücklaufwucht

$$E_{Ro} = 114 \text{ kNm}$$

wird durch die starre Lagerung im Fahrzeugkasten im Verhältnis $m_{Rohr}/m_{Rohr} + m_{Laf}$ herabgesetzt, d. h. es gilt

$$E_{Ro} = 114 \frac{750}{10\,750} = 7{,}95 \text{ kNm}.$$

Vergleichsstrecke $s_V = \frac{E_{Ro}}{\hat{F}_0} = \frac{7{,}95 \text{ kNm}}{2310 \text{ kN}} = 0{,}0034$ m

Für den Federweg $\hat{s}_R = 34$ mm $= 10\, s_V$

gilt nach Bild 917: $\hat{F}_1/\hat{F}_0 = 0{,}2$;

somit Federbelastung $\hat{F}_1 = 0{,}2 \cdot 2\,310 = 462$ kN.

9.7. Wirkung einer Mündungsbremse

9.7.1. Grundsätzliche Wirkungsweise

Die Rücklaufwucht des Rohres wird verringert, wenn man die mit Überschallgeschwindigkeit aus der Mündung ausströmenden Pulvergase auf Prallflächen wirken läßt, die mit dem Rohr verbunden sind (Bild 921)[1].

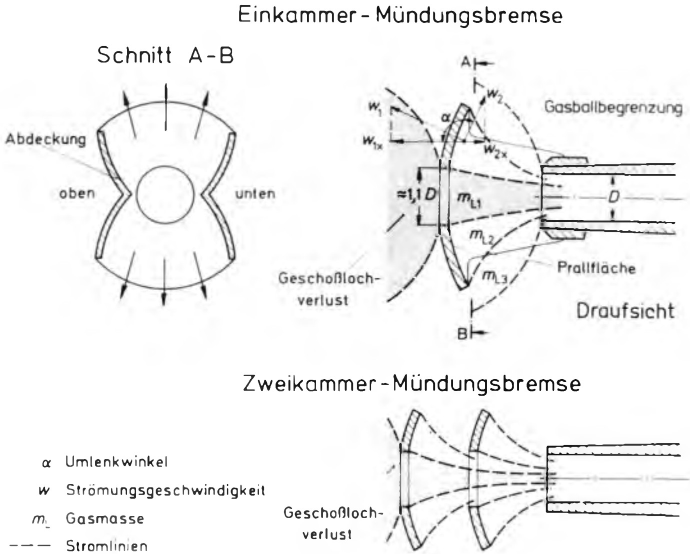


Bild 921. *Wirkungsweise einer Mündungsbremse.*

In der Prallfläche muß natürlich für den freien Durchflug des Geschosses eine Öffnung mit etwa dem 1,1fachen Kaliberdurchmesser freigelassen werden.

Ohne Mündungsbremse breiten sich die Gase vor der Mündung in einer Pulvergasglocke längs Stromlinien aus, die in Bild 921 gestrichelt angedeutet sind. Bei entsprechender Ausbildung der Mündungsbremse treffen die Stromlinien ungestört erst kurz vor der Prallfläche auf eine

[1]) Vgl. Kap. 2, Innere Ballistik, Abschn. 2.1.6, Der Rohrrücklauf und die Mündungsbremse.

stehende Stoßwelle, hinter der sie etwa entsprechend dem Umlenkwinkel α der Prallfläche nach außen gelenkt werden. Die Änderung der Geschwindigkeitskomponente in Schußrichtung w_{1x} in w_{2x} ergibt eine Impulsänderung der Gasmasse, die nach dem Gesetz „actio = reactio" einen gleich großen Antrieb in Schußrichtung auf die Prallfläche ausübt. Diese Wirkung geht allerdings nur von dem Anteil m_{L2} der gesamten Gasmasse aus, während der Impuls des Anteils m_{L1} als Geschoßlochverlust ungenutzt abströmt. Allenfalls bringt bei zu kleiner Prallfläche ein außen vorbeiströmender Anteil m_{L3} einen weiteren Verlust.

Da nach unten gelenkte Gase, namentlich bei kleiner Rohrerhöhung, Staub und Erdreich hochwirbeln würden, werden Mündungsbremsen im allgemeinen nur mit seitlichen Austrittsöffnungen gebaut. Bei der in Bild 921 gezeigten Ausführung wird die Mündungsbremse oben und unten durch Abdeckwände geschlossen (s. Schnitt AB), die gleichzeitig die Prallflächenbelastung auf das Rohr übertragen.

Der Geschoßlochverlust, der günstigenfalls rd. 30 % des gesamten Gasimpulses beträgt, kann verringert werden durch eine nachgeschaltete zweite Prallfläche, wodurch eine sog. Zweikammer-Mündungsbremse entsteht (Bild 921).

Außer den in Bild 921 schematisch dargestellten gebräuchlichen Einkammer- und Zweikammer-Mündungsbremsen gibt es noch zahlreiche Sonderformen, von denen Bild 922 zwei Ausführungen zeigt.

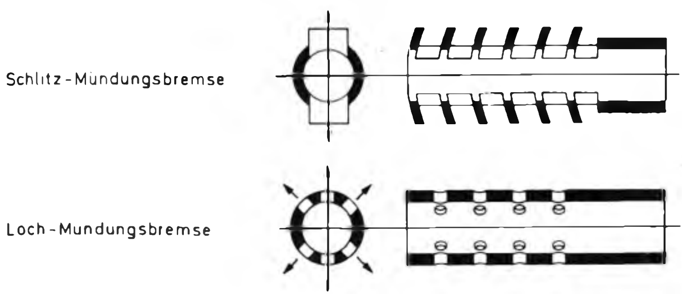


Bild 922. *Sonderformen von Mündungsbremsen.*

Die Wirkung einer Mündungsbremse nimmt mit steigendem Umlenkwinkel α zu (s. Bild 921). Weitere wesentliche Einflußgrößen sind der Abstand der Prallflächen von der Mündung bzw. voneinander und der Außendurchmesser der Prallflächen.

Mit der Umlenkung der Gase nach rückwärts ist eine erhöhte Belästigung der Bedienungsmannschaft durch die Knalldruckwelle verbunden, die vor den austretenden Pulvergasen herläuft.

9.7.2. **Impulsgrößen**

Die theoretische Ermittlung des Strömungs- und Druckverlaufes in einer Mündungsbremse ist nur näherungsweise mit umfangreichen gasdynamischen Berechnungen möglich. Verhältnismäßig einfach ist jedoch die Berechnung der Wirkung einer ausgeführten Mündungsbremse auf den Rohrrücklauf nach experimentell ermittelten Kennwerten.

Voraussetzung für diese Berechnung ist die Definition einer Reihe von Impuls- und Antriebsgrößen. In die schematischen Skizzen (Bild 923) des aus Geschoß, Pulvergasen (Ladung) und Rohr bestehenden Massensystems sind die Bezeichnungen der zugehörigen Impulse (= Bewegungsgrößen m · v) eingetragen.

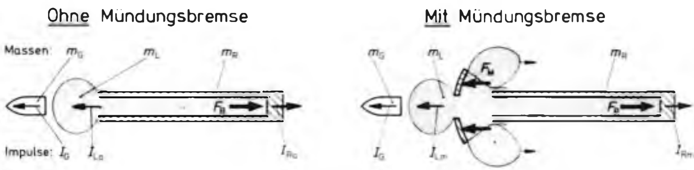


Bild 923. *Impulse ohne und mit Mündungsbremse.*

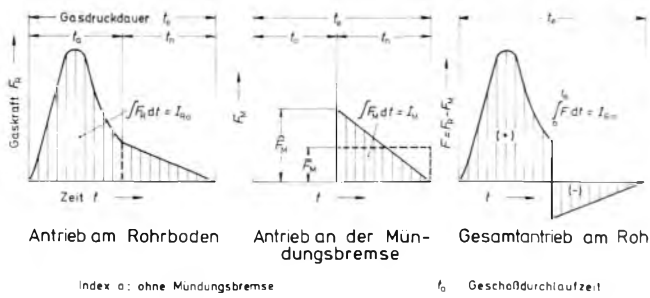


Bild 923a. *Antrieb der Gaskräfte.*

Es bedeuten:

I_G	Geschoßimpuls
I_{Lo}	Impuls der Ladung *ohne* Mündungsbremse
I_{Lm}	Impuls der Ladung *mit* Mündungsbremse
I_{Ro}	Impuls der Rücklaufmasse *ohne* Mündungsbremse
I_{Rm}	Impuls der Rücklaufmasse *mit* Mündungsbremse
I_M	Antrieb an der Mündungsbremse.

Aus den Kraft-Zeit-Diagrammen (Bild 923a) für die auf das Rohr ohne und mit Mündungsbremse wirkenden Gaskräfte sind die Antriebsgrößen $\int F_R \, dt$ am Rohrboden und $I_M = \int F_M \, dt$ an der Mündungsbremse ersichtlich. Ohne Mündungsbremse gilt nach dem Impulssatz

$$\int_0^{t_e} F_R \, dt = I_{Ro}.$$

Da am Rohr mit Mündungsbremse zu dem in gleicher Größe wirkenden Antrieb auf den Rohrboden der in umgekehrter Richtung wirkende Antrieb I_M auf die Mündungsbremse hinzukommt, gilt für den Gesamtimpuls des Rohres *mit* Mündungsbremse (vgl. Bild 923a)

$$I_{Rm} = I_{Ro} - I_M. \tag{63}$$

Hieraus folgt für den Antrieb an der Mündungsbremse

$$I_M = I_{Ro} - I_{Rm}. \tag{64}$$

9.7.3. Kennwerte

Die Wirkung einer Mündungsbremse kann durch drei verschiedene Werte gekennzeichnet werden.

a) **Triebziffer λ_M**

Definition:

$$\boxed{\lambda_M = \frac{\Delta I_R}{I_{Ro}} = \frac{I_{Ro} - I_{Rm}}{I_{Ro}}} \tag{65}$$

(Verhältnismäßige Änderung des Rücklaufimpulses), wobei

I_{Ro} = Rücklaufimpuls *ohne* Mündungsbremse,
I_{Rm} = Rücklaufimpuls *mit* Mündungsbremse.

Mit Gleichung (64) gilt auch

$$\lambda_M = \frac{I_M}{I_{Ro}}. \tag{66}$$

Die Triebziffer ist am einfachsten einer direkten Messung zugänglich. Sie wird im allgemeinen nur als Zwischenwert für die Ermittlung der anderen beiden Kennwerte benutzt.

b) **Leistungsziffer σ_M**

Definition:

$$\boxed{\sigma_M = \frac{\Delta I_L}{I_{Lo}} = \frac{I_{Lo} - I_{Lm}}{I_{Lo}}} \tag{67}$$

(Verhältnismäßige Änderung des Impulses, d.h. der Bewegungsgröße der Pulvergase), wobei

I_{Lo} = Impuls der Pulvergase *ohne* Mündungsbremse,
I_{Lm} = Impuls der Pulvergase *mit* Mündungsbremse.

Da der auf die Mündungsbremse wirkende Antrieb gleich der Impulsänderung der Pulvergase ist (s. Seite 414), gilt

$$I_M = I_{Lo} - I_{Lm} \tag{68}$$

und

$$\sigma_M = \frac{I_M}{I_{Lo}} . \tag{69}$$

Dieses Verhältnis ist in erster Näherung unabhängig von der Größe der Ladung und hängt nur von der Form und den Abmessungen der Mündungsbremse ab. Die Leistungsziffer σ_M ist also ein Kennwert, der eine Mündungsbremse weitgehend unabhängig von der speziellen Anwendung auf ein bestimmtes Rohr und eine bestimmte Munition kennzeichnet. Mit Benutzung von σ_M kann der praktisch wichtigste Kennwert η_M für beliebige Verhältnisse berechnet werden.

Da nach Gleichung (24a) für den Rücklaufimpuls

$$I_{Ro} = I_G + I_{Lo} \tag{70}$$

gilt, kann man Gleichung (69) mit Benutzung der Gleichung (64) auch in der Form

$$\sigma_M = \frac{I_M}{I_{Ro} - I_G} = \frac{I_{Ro} - I_{Rm}}{I_{Ro} - I_G} \tag{71}$$

schreiben.

Theoretisch kann σ_M bei maximaler Umlenkung der Pulvergase bis etwa 2,3 ansteigen, praktisch wurden Werte von 1,5 erreicht [5]. Da jedoch mit einem hohen σ_M-Wert bei großen Ladungen eine untragbare Belästigung der Bedienungsmannschaft durch den Knalldruck verbunden ist, bleibt man im allgemeinen erheblich unter diesem Wert.

Bemerkung: In Großbritannien und den Vereinigten Staaten wird anstelle der Leistungsziffer σ_M die Cornersche Kennzahl

$$B = \frac{I_M}{I_{Lo} - m_L v_o/2} = \frac{I_{Ro} - I_{Rm}}{I_{Ro} - (I_G + m_L v_o/2)}$$

benutzt. Bei diesem Kennwert wird als Bezugsgröße für die verhältnismäßige Änderung des Pulvergasimpulses nicht der gesamte Gasimpuls I_{Lo} eingesetzt, sondern davon der Gasimpuls bei Geschoßaustritt $m_L v_o/2$ abgezogen.

c) **Wirkungswert η_M**

Definition:

$$\eta_M = \frac{\Delta E_R}{E_{Ro}} = \frac{E_{Ro} - E_{Rm}}{E_{Ro}} \tag{72}$$

(Verhältnismäßige Änderung der Rücklaufwucht) mit

E_{Ro} = Rücklaufwucht bei *freiem* Rücklauf *ohne* Mündungsbremse,
E_{Rm} = Rücklaufwucht bei *freiem* Rücklauf *mit* Mündungsbremse.

Der Kennwert η_M erfaßt definitionsgemäß ebenso wie die Kennwerte λ_M und σ_M allein die Wirkung der Gaskräfte ohne den Einfluß von Reibungs- oder Bremskräften an den rücklaufenden Teilen. Er ist dadurch unabhängig von der Einregulierung der Rohrbremse.

Der Wirkungswert η_M ist eine für die Lafettenkonstruktion wichtige Kenngröße, da er unmittelbar angibt, wie weit die von der Lafette aufzunehmende Rücklaufwucht herabgesetzt wird. Aus Gleichung (72) folgt für die Rücklaufwucht mit Mündungsbremse

$$E_{Rm} = E_{Ro}(1 - \eta_M). \tag{73}$$

Obwohl es möglich wäre, Mündungsbremsen zu bauen, die bei großen Ladungen Wirkungswerte von über 80 % erreichen, bleibt man mit Rücksicht auf die mit hohen η_M-Werten verbundene starke Knallbelästigung im allgemeinen im Bereich von 30 bis 50 %.

9.7.4. Beziehungen zwischen den Kennwerten

Aus $E_R = \frac{m_R v_R^2}{2}$ und $I_R = m_R v_R$

folgt,

wenn v_{Ro} die Rücklaufgeschwindigkeit *ohne* Mündungsbremse
und v_{Rm} die Rücklaufgeschwindigkeit *mit* Mündungsbremse

bedeutet,

$$\frac{E_{Rm}}{E_{Ro}} = \frac{v_{Rm}^2}{v_{Ro}^2} = \frac{I_{Rm}^2}{I_{Ro}^2}.$$

Damit lautet Gleichung (72)

$$\eta_M = 1 - \frac{E_{Rm}}{E_{Ro}} = 1 - \left(\frac{I_{Rm}}{I_{Ro}}\right)^2. \tag{72a}$$

Mit $\lambda_M = 1 - \frac{l_{Rm}}{l_{Ro}}$ (74)

erhält man

$$\eta_M = 1 - (1 - \lambda_M)^2 \quad (75)$$

oder

$$\boxed{\eta_M = 2\lambda_M - \lambda_M^2} \quad (76)$$

bzw. $\lambda_M = 1 - \sqrt{1 - \eta_M}$ (Bild 924). (77)

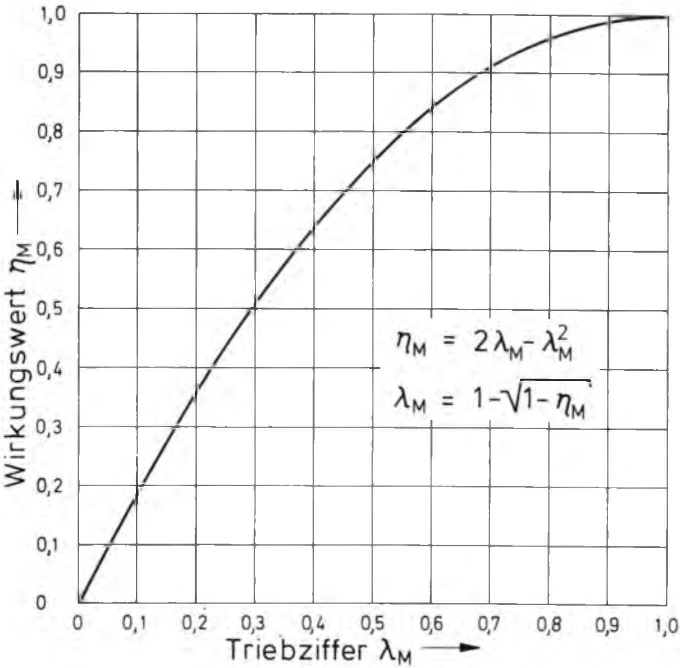


Bild 924. *Zusammenhang zwischen Triebziffer λ_M und Wirkungswert η_M.*

Aus $\lambda_M = \frac{I_M}{I_{Ro}}$

und $\sigma_M = \frac{I_M}{I_{Lo}}$

folgt $\lambda_M = \sigma_M \frac{I_{Lo}}{I_{Ro}}$. (78)

Mit $I_{Lo} = m_L \overline{w} = m_L \beta v_o$ (vgl. Gleichung (29))

und $I_{Ro} = m_G v_o + m_L \beta v_o$ (vgl. Gleichung (70))

lautet Gleichung (78)

$$\boxed{\lambda_M = \sigma_M \frac{\beta m_L}{m_G + \beta m_L}} \qquad (79)$$

oder $\lambda_M = \sigma_M \frac{\beta m_L/m_G}{1 + \beta m_L/m_G}$. (80)

Da die Leistungsziffer σ_M erfahrungsgemäß unabhängig von den speziellen Einsatzbedingungen der Mündungsbremse ist, kann damit der bei bestimmten Größen von m_G, m_L und β ermittelte Wert von σ_M benutzt werden, um die Triebziffer λ_M für beliebige Ladungen und Geschoßgewichte vorauszuberechnen. Damit ist über Gleichung (76) bzw. nach dem Diagramm Bild 924 auch der Wirkungswert η_M bekannt.

Umgekehrt kann, wenn η_M für spezielle Einsatzbedingungen bekannt ist, über λ_M aus Gleichung (79) der Wert σ_M berechnet und zur Umrechnung von η_M für andere Ladungen und Geschoßgewichte benutzt werden (s. Beispiel S. 427).

Der durch die Gleichungen (76) und (79) gegebene Zusammenhang zwischen σ_M und η_M ist im Schaubild 925 mit $\beta m_L/m_G$ als Parameter grafisch dargestellt. Man erkennt aus diesem Schaubild anschaulich, wie für eine bestimmte Mündungsbremse mit festliegendem σ_M, z. B. σ_M = 1,0, der Wirkungswert η_M mit steigendem Verhältnis $\beta m_L/m_G$, d. h. im allgemeinen mit steigender Ladung, anwächst.

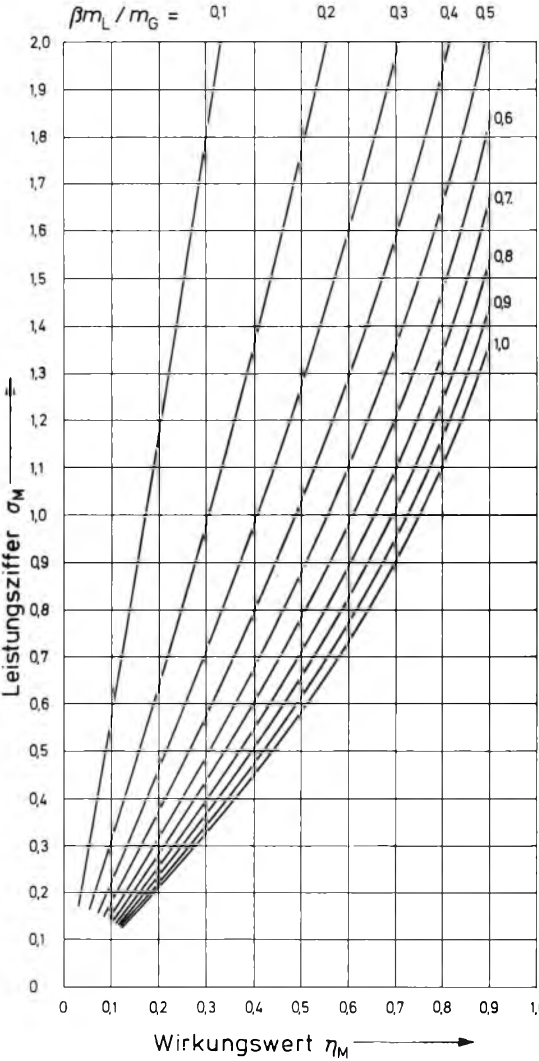


Bild 925. *Zusammenhang zwischen Wirkungswert* η_M *und Leistungsziffer* σ_M.

9.7.5. Messung der Kennwerte

a) Ermittlung auf dem Rücklaufmeßstand

Um bei der Ermittlung der von den Gaskräften herrührenden Impulse den störenden Einfluß von Reibungs-, Brems- und Vorholerkräften auszuschalten, wird das Rohr auf dem Wagen eines Rücklaufmeßstandes (Bild 926) gelagert.

Der ungebremst zurückrollende Wagen wird erst nach Gaskraftende und nachdem die erreichte Rücklaufgeschwindigkeit gemessen ist, von einem Puffer aufgefangen.

Das Gewicht des Wagens ist ohne Einfluß auf die Größe der Rücklaufimpulse, denn es gilt

$$I_{Ro} = m_R v_{Ro} = m'_R v'_{Ro}$$

und

$$I_{Rm} = m_R v_{Rm} = m''_R v''_{Rm} ,$$

wobei m'_R die gewogene Masse von Wagen + Rohr,

m''_R die gewogene Masse von Wagen + Rohr + Mündungsbremse,

v'_{Ro} die gemessene Rücklaufgeschwindigkeit *ohne* Mündungsbremse

und v''_{Rm} die gemessene Rücklaufgeschwindigkeit *mit* Mündungsbremse

bedeutet.

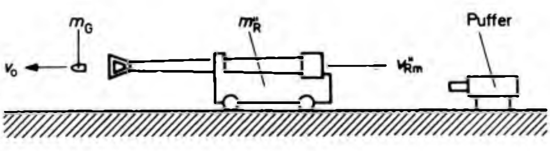


Bild 926. *Rücklaufmeßstand.*

Ermittelt man auch noch den Geschoßimpuls

$$I_G = m_G v_o$$

durch gleichzeitige Messung der v_O, so erhält man aus den Meßergebnissen am Rücklaufmeßstand nach den Gleichungen (74), (72a) und (71) die Kennwerte

$$\lambda_M = 1 - \frac{I_{Rm}}{I_{Ro}},$$

$$\eta_M = 1 - \left(\frac{I_{Rm}}{I_{Ro}}\right)^2$$

und
$$\sigma_M = \frac{I_{Ro} - I_{Rm}}{I_{Ro} - I_G}.$$

b) **Ermittlung am Geschütz**

Die an einem Geschütz mit der dafür bestimmten Mündungsbremse gemessenen Bremskräfte und Rücklaufwuchten sind das für den Erfolg maßgebende Endergebnis einer Mündungsbremsenkonstruktion, so daß es nebensächlich erscheint, daß die daraus berechneten Kennwerte weniger zuverlässig sind als Werte, die auf dem Rücklaufmeßstand ermittelt werden.

Will man jedoch die Wirkung dieser Mündungsbremse für andere, noch nicht erprobte Ladungen und Munitionsarten oder für den Einsatz mit anderen Rohrgewichten vorausberechnen, so sind möglichst genau ermittelte Kennwerte von Bedeutung.

Bei der Ermittlung von Kennwerten am Geschütz sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

1. Der Vergleichsschuß *ohne* Mündungsbremse ist im allgemeinen mit Rücksicht auf die Lafettenbelastung nur mit kleiner Ladung möglich. Die Umrechnung auf größere Ladungen (nach Schaubild 925) ist mit der Unsicherheit der β-Werte behaftet.

2. Da die Rücklaufwucht nicht, wie der Rücklaufimpuls, unabhängig von der Rücklaufmasse ist, sondern durch das zusätzliche Gewicht der Mündungsbremse etwas verringert wird, muß dieser Einfluß bei der Berechnung von η_M getrennt erfaßt werden.

Wie im folgenden Abschnitt 9.8 (s. Gleichung (91)) abgeleitet wird, gilt, wenn man die Bremsarbeit A_R gleich der Rücklaufwucht E_R setzt,

$$\eta_M = 1 - \frac{A_{Rm}}{A_{Ro}} \cdot \frac{m_{Rm}}{m_{Ro}}, \qquad (81)$$

wobei

A_{Ro} die Bremsarbeit (hydraulische Bremsarbeit, Vorholerenergie und Reibungsarbeit) *ohne* Mündungsbremse,
A_{Rm} die Bremsarbeit *mit* Mündungsbremse,
m_{Ro} die Rücklaufmasse *ohne* Mündungsbremse
und m_{Rm} die Rücklaufmasse *mit* Mündungsbremse

bedeutet.

3. Das Verhältnis A_{Rm}/A_{Ro} stimmt bei Anfangsbremsung, die praktisch stets mehr oder weniger vorliegt, nicht genau mit dem Verhältnis E_{Rm}/E_{Ro} für freien Rücklauf überein, das definitionsgemäß der Berechnung von η_M zugrunde zu legen ist.

Man kann diesen Fehler vermeiden, wenn man den *zeitlichen* Kraftverlauf in der Rohrbremse mißt und mit Einbeziehung der Vorholer- und Reibungskräfte sowie der Gewichtskraftkomponente $G_R \sin \epsilon$ (s. Bild 927) den gesamten Bremsantrieb $I_{Br} = \int K dt$ ermittelt. Nach den Betrachtungen bei 9.6.4 (S. 400) gilt unabhängig vom Verlauf der Bremsung nach Gleichung (48)

$$I_R = I_{Br}.$$

Entsprechend gilt für den Bremsimpuls *ohne* Mündungsbremse

$$I_{Bro} = I_{Ro}$$

und für den Bremsimpuls *mit* Mündungsbremse

$$I_{Brm} = I_{Rm}.$$

Die Berechnung der Kennwerte kann also analog zu den für freien Rücklauf geltenden Formeln (s. S. 423) nach den Gleichungen

$$\lambda_M = 1 - \frac{I_{Brm}}{I_{Bro}}, \tag{82}$$

$$\eta_M = 1 - \left(\frac{I_{Brm}}{I_{Bro}}\right)^2 \tag{83}$$

und

$$\sigma_M = \frac{I_{Bro} - I_{Brm}}{I_{Bro} - I_G} \tag{84}$$

erfolgen.

9.7.6. Belastung der Mündungsbremse

Die auf die Mündungsbremse wirkende Kraft F_M, die einer direkten Messung kaum zugänglich ist, kann, wie aus dem Diagramm für I_M in Bild 923a ersichtlich ist, aus der Beziehung

$$F_M = \frac{I_M}{t_n} \tag{85}$$

berechnet werden; darin ist

$\bar{F}_M$ = mittlere Mündungsbremsenbelastung,

t_n = Nachwirkungsdauer.

Der Gaskraftantrieb an der Mündungsbremse

$$I_M = \lambda_M \, I_{Ro} \text{ (nach Gleichung (66))}$$

wird nach Gleichung (31) aus dem Rücklaufimpuls

$$I_{Ro} = m_R \, v_{Re} = (m_G + \beta m_L) v_o$$

berechnet.

Setzt man für t_n nach Gleichung (40)

$$t_n = \frac{2(\beta - 0{,}5) m_L v_o}{F_a}$$

ein, so erhält man

$$\bar{F}_M = \frac{\lambda_M (\beta + m_G/m_L)}{2(\beta - 0{,}5)} \cdot F_a, \tag{86}$$

d.h. die mittlere Mündungsbremsenbelastung ist proportional zur Mündungsgaskraft F_a.

Für die Maximalkraft gilt näherungsweise bei Annahme einer mit der Zeit linearen Gasdruckabnahme

$$\hat{F}_M \approx 2 \, \bar{F}_M \tag{87}$$

(s. Beispiel S. 427).

9.8. Erforderliche Bremskraft mit Mündungsbremse

Bei der Berechnung der Bremskraft für ein mit einer Mündungsbremse versehenes Geschütz ist zu berücksichtigen, daß die Rücklaufwucht

a) bei unveränderter Rücklaufmasse durch den auf die Mündungsbremse ausgeübten Impuls,

b) unabhängig von diesem Impuls durch die zusätzliche Masse der Mündungsbremse

herabgesetzt wird.

Für den Einfluß a) gilt nach Gleichung (73)

$$E_{Rm} = E_{Ro} (1 - \eta_M),$$

d.h. die Mündungsbremse verzehrt den Anteil $\eta_M \cdot E_{Ro}$.

Für den Einfluß b) gilt, wenn man von einem unveränderten Rücklaufimpuls $I_{Rm} = m_R v_R$ ausgeht, bei Änderung des Rücklaufgewichtes

$$v'_R/v_R = m_{Ro}/m_{Rm};$$

darin ist wiederum

m_{Ro} = Rücklaufmasse *ohne* Mündungsbremse,

m_{Rm} = Rücklaufmasse *mit* Mündungsbremse,

v_R = Rücklaufgeschwindigkeit ohne zusätzliche Masse der Mündungsbremse,

v'_R = Rücklaufgeschwindigkeit mit zusätzlicher Masse der Mündungsbremse;

d.h. bei unverändertem Rücklaufimpuls verhalten sich die Rücklaufgeschwindigkeiten umgekehrt wie die Massen bzw. Gewichte.

Das Verhältnis der Rücklaufenergien $E'_R = m_{Rm} v'^2_R/2$ und $E_R = m_{Ro} v^2_R/2$ ist somit

$$E'_R/E_R = m_{Rm}/m_{Ro} \cdot (m_{Ro}/m_{Rm})^2 = m_{Ro}/m_{Rm}. \qquad (88)$$

Für die gleichzeitige Wirkung der Einflüsse a) und b) erhält man durch Verknüpfung der Gleichungen (73) und (88)

$$E'_{Rm} = E_{Ro} (1 - \eta_M) \; m_{Ro}/m_{Rm} \qquad (89)$$

mit E_{Ro} = Rücklaufwucht *ohne* Mündungsbremse

und E'_{Rm} = Rücklaufwucht *mit* Mündungsbremse unter Berücksichtigung der zusätzlichen Masse.

Entsprechend Gleichung (60) ergibt sich hieraus die mittlere Bremskraft mit Mündungsbremse

$$\boxed{\bar{K}_m = \frac{E_{Ro}}{\rho} (1 - \eta_M) \, \frac{m_{Ro}}{m_{Rm}}.} \qquad (90)$$

Bei unverändertem Rücklaufweg ρ bringt also die Mündungsbremse eine Herabsetzung der mittleren Bremskraft im Verhältnis

$$\frac{\bar{K}_m}{\bar{K}_o} = (1 - \eta_M) \, \frac{m_{Ro}}{m_{Rm}}.$$

Die aus Gleichung (89) umgerechnete Beziehung

$$\eta_M = 1 - \frac{E'_{Rm}}{E_{Ro}} \, \frac{m_{Rm}}{m_{Ro}} \qquad (91)$$

ist zu berücksichtigen, wenn der Wirkungswert η_M durch Messung der Rücklaufwucht ohne und mit Mündungsbremse ermittelt werden soll (s. Abschnitt 9.7.5b, S. 423).

Für die Berechnung der hydraulischen Rohrbremse sind die Rücklaufgeschwindigkeiten bei Geschoßaustritt und bei Gaskraftende von Bedeutung; sie können näherungsweise für freien Rücklauf berechnet werden.
Da die Mündungsbremse erst nach Geschoßaustritt wirksam wird, kann die Rücklaufgeschwindigkeit v_{Ra} bei Geschoßaustritt unverändert nach Gleichung (26) berechnet werden, wobei selbstverständlich die Rücklaufmasse m_{Rm} *mit* Mündungsbremse einzusetzen ist.

Die Rücklaufgeschwindigkeit v_{Rem} bei Gaskraftende (mit Mündungsbremse) muß dagegen aus der nach Gleichung (89) berechneten Rücklaufwucht mittels der Beziehung

$$E'_{Rm} = \frac{m_{Rm} \, v_{Rem}^2}{2}$$

ermittelt werden.

Mit $$v_{Rem} = \sqrt{\frac{2 E'_{Rm}}{m_{Rm}}} \quad \text{(mit Mündungsbremse)}$$

und $$v_{Reo} = \sqrt{\frac{2 E_{Ro}}{m_{Ro}}} \quad \text{(ohne Mündungsbremse)}$$

erhält man nach Einsetzen von E'_{Rm} nach Gleichung (89)

$$v_{Rem} = \sqrt{1 - \eta_M} \; \frac{m_{Ro}}{m_{Rm}} \; v_{Reo} \tag{92}$$

oder mit Gleichung (31)

$$\boxed{v_{Rem} = \sqrt{1 - \eta_M} \; \frac{m_G + \beta m_L}{m_{Rm}} \; v_o.} \tag{93}$$

Beispiel: 105-mm-Haubitze ohne und mit Mündungsbremse (vgl. S. 396 und 404)

Gegeben:

v_o	= 630 m/s	m_{Ro}	= 750 kg
m_G	= 15,0 kg	$m_{MüBr}$	= 30 kg
m_L	= 3,0 kg	m_{Rm}	= 780 kg
ρ	= 1,0 m	β	= 1,9

Mündungsgaskraft

$$F_a = 648 \text{ kN}$$
$$E_{Ro} = 114 \text{ kNm}.$$

Mittlere Bremskraft *ohne* Mündungsbremse

$$\overline{K}_o = 114 \text{ kN}$$

Wirkungswert der Mündungsbremse bei obiger Ladung und v_o

$$\eta_M = 0{,}40$$

Berechnet:

Mittlere Bremskraft *mit* Mündungsbremse (nach Gleichung (90))

$$\overline{K}_m = \frac{114}{1{,}0}(1 - 0{,}4)\,\frac{750}{780} = 65{,}8 \text{ kN}$$

Die mittlere Bremskraft wird also durch das Mündungsbremsengewicht um etwa 4 %, durch die gasdynamische Wirkung der Mündungsbremse um 40 % herabgesetzt.

Rücklaufgeschwindigkeit bei Geschoßaustritt (nach Gleichung (26))

$$v_{Ram} = \frac{15{,}0 + 0{,}5 \cdot 3{,}0}{780}\,630 = 13{,}3 \text{ m/s}$$

Rücklaufgeschwindigkeit bei Gaskraftende (nach Gleichung (93))

$$v_{Rem} = \sqrt{1-0{,}40} \cdot \frac{15{,}0 + 1{,}9 \cdot 3{,}0}{780}\,630 = 13{,}0 \text{ m/s}$$

Ohne Mündungsbremse war im Beispiel auf Seite 396 $v_{Rao} = 13{,}9$ m/s und $v_{Reo} = 17{,}4$ m/s berechnet worden.

Triebziffer (nach Bild 924) $\lambda_M = 0{,}23$

Leistungsziffer (aus Gleichung (79))

$$\sigma_M = 0{,}23 \cdot \frac{15{,}0 + 1{,}9 \cdot 3{,}0}{1{,}9 \cdot 3{,}0} = 0{,}84$$

Mittlere Mündungsbremsenbelastung (nach Gleichung (86))

$$\overline{F}_M = \frac{0{,}23 \cdot (1{,}9 + 15{,}0/3{,}0)}{2(1{,}9 - 0{,}5)} \cdot 648 = 367 \text{ kN}$$

Maximale Mündungsbremsenbelastung (nach Gleichung (87))

$$\hat{F}_M \approx 2 \cdot 367 = 734 \text{ kN}$$

Umrechnung der Kennwerte für eine andere Ladung mit $m_{L1} = 2{,}0$ kg und $v_{01} = 520$ m/s:

$$\beta_1 = \frac{1200}{520} = 2{,}3,$$

σ unverändert.

Nach Gleichung (79):

$$\lambda_{M1} = 0{,}84 \cdot \frac{2{,}3 \cdot 2{,}0}{15{,}0 + 2{,}3 \cdot 2{,}0} = 0{,}197;$$

nach Bild 924 bzw. nach Gleichung (76):

$$\eta_{M1} = 0{,}36$$

Der Wirkungswert für die kleinere Ladung ist also um 4 % kleiner.

9.9. Kräfte am Geschütz mit Rohrrücklauf

Nachdem in den Abschnitten 9.6 und 9.8 die für die Belastung der Lafette wesentliche Bremskraft K berechnet wurde, soll hier das Zusammenspiel dieser Kraft mit anderen an den Geschützteilen angreifenden Kräften behandelt werden.

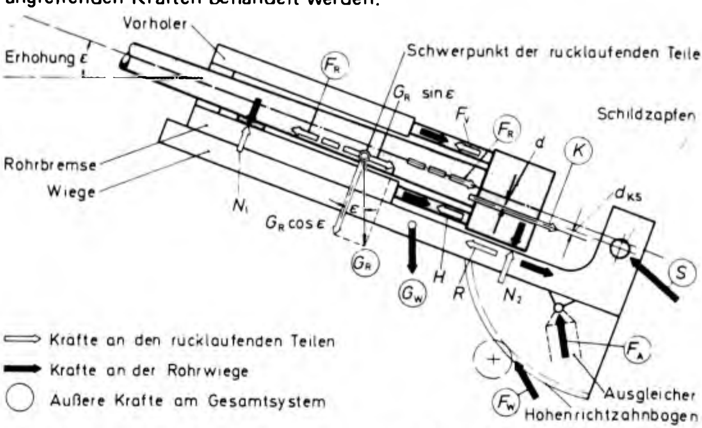


Bild 927. Kräfte an den höhenrichtbaren Teilen (schematisch).

Die Betrachtung soll sich zunächst auf die Baugruppe erstrecken, die, um die Schildzapfen schwenkbar, die Rohrwiege mit dem darauf zurücklaufenden Rohr und dem gesamten Rohrbrems- und Vorholsystem umfaßt. Man bezeichnet diese Baugruppe als „höhenrichtbare Teile" oder kurz „Höhenrichtteil". In der schematischen Skizze Bild 927 sind die Hauptteile dieser Baugruppe dargestellt, und zwar einerseits (gerastert) die rücklaufenden Teile, d. h. das Rohr mit den Kolbenstangen von Rohrbremse und Rohrvorholer, und anderseits die Rohrwiege mit den daran befestigten Zylindern von Rohrbremse und Vorholer, mit den Schildzapfen und dem Höhenrichtbogen. (Die Schildzapfen sind in der Skizze der Übersichtlichkeit wegen außergewöhnlich weit nach rückwärts verlegt.)

9.9.1. Kräfte an den rücklaufenden Teilen beim Schuß

a) **Parallel zur Seelenachse wirken:**

Flüssigkeitsbremskraft H (an der Bremskolbenstange)

Vorholerkraft F_V (an der Vorholerkolbenstange)

Reibungskraft R (Kolbenstangen-, Kolben- und Gleitbahnreibung)

Gewichtskraftkomponente $G_R \sin \epsilon = m_R\, g \sin \epsilon$ (am Schwerpunkt der rücklaufenden Teile)

Ferner nur während der Gasdruckdauer:

Gaskraft F_R (in der Seelenachse)

Nach dem Prinzip von d'ALEMBERT kann man durch Hinzufügen der Trägheitskräfte (absolute Größe = Masse mal Beschleunigung, Richtung entgegengesetzt zur Beschleunigung) eine dynamische Aufgabe auf eine statische Gleichgewichtsaufgabe zurückführen.

Das bedeutet, daß während der Rücklaufbremsung im Schwerpunkt der rücklaufenden Teile in Rücklaufrichtung eine Trägheitskraft $m_R\, a_R$ anzubringen ist, wobei a_R den absoluten Betrag der Bremsverzögerung bedeutet. Diese nach rückwärts gerichtete Trägheitskraft ist der absoluten Größe nach gleich der gesamten die Bremsverzögerung erzwingenden Bremskraft K und wird deshalb in Bild 927 mit dem gleichen Buchstaben K bezeichnet. Da, wie im folgenden Abschnitt 9.9.2 gezeigt wird, die Trägheitskraft K in der angegebenen Richtung als Belastung der Lafette in Erscheinung tritt, kann sie auch als „Bremsrückstoßkraft" bezeichnet werden (s. Abschn. 8.2.1.1, Seite 338).

Aus dem Gleichgewicht der Kräfte in Richtung der Seelenachse folgt, wenn man zunächst von der Gaskraft F_R absieht, die Bremsrückstoßkraft

$$\boxed{K = H + F_v + R - G_R \sin \epsilon.} \tag{94}$$

Es ist zu beachten, daß man allgemein unter „Bremskraft" die gesamte Verzögerungskraft = Bremsrückstoßkraft K und *nicht* die Flüssigkeitsbremskraft H versteht.

Während der Gasdruckdauer wird durch die Gaskraft F_R auf den Rohrboden zusätzlich eine gleich große, entgegengesetzt gerichtete Trägheitskraft F_R am Schwerpunkt der rücklaufenden Teile verursacht. Beide Kräfte bilden ein Kräftepaar $F_R \cdot d$, wobei d der Abstand des Schwerpunktes von der Seelenachse ist.

b) **Senkrecht zur Seelenachse wirken:**

Führungskräfte N_1 und N_2 (an den Rohrklauen oder entsprechenden Gleitflächen des Rohres)

Gewichtskraftkomponente $G_R \cos \epsilon$ (am Schwerpunkt der rücklaufenden Teile)

Die Kräfte N_1 und N_2 können aus dem Momentengleichgewicht sämtlicher Kräfte um einen mit N_1 bzw. N_2 zusammenfallenden Pol berechnet werden.

c) Die Flüssigkeitsbremskraft H wird in Abschnitt 9.11.2, die Vorholerkraft F_v in Abschnitt 9.11.3 ausführlicher behandelt.

Die Reibungskraft R setzt sich einerseits aus den Reibungen an den Kolbenstangendichtungen an Bremse und Vorholer sowie der Kolbendichtung im Vorholer und anderseits aus der Gleitbahnreibung des Rohres zusammen.

Während die Dichtungsreibung nur durch Erfahrungswerte berücksichtigt werden kann, gilt für die Gleitbahnreibung

$$R_{Gl} = \mu \, (|N_1| + |N_2|), \tag{95}$$

wobei μ = Reibungszahl

und $|N_1|$, $|N_2|$ = Absolutwerte der Führungskräfte.

Bei normalen Geschützen beträgt die gesamte Reibungskraft etwa 3 bis 9 % der Bremskraft K.

9.9.2. Kräfte am System Rohr-Rohrwiege

Will man das Kräftegleichgewicht am Gesamtsystem Rohr-Rohrwiege betrachten, so sind in Bild 927 außer den in Abschnitt 9.9.1 behandelten Kräften an den rücklaufenden Teilen sämtliche die *Rohrwiege* belastenden Kräfte einzutragen.

Dabei entsprechen den auf das Rohr wirkenden Kräften H, F_V, R, N_1 und N_2 jeweils gleich große, entgegengesetzt wirkende Kräfte auf die Wiege. Für das Gesamtsystem sind diese Kräfte also *innere* Kräfte, die bei der Gleichgewichtsbetrachtung wegfallen.

Es bleiben folgende *äußeren* Kräfte, deren Symbol in Bild 927 durch einen einschließenden Kreis gekennzeichnet ist:

Bremsrückstoßkraft	K,
Rücklaufgewichtskraft	G_R,
Gewichtskraft der Rohrwiege	G_W,
Richtmaschinenkraft	F_W,
Ausgleicherkraft	F_A,
Schildzapfenkraft	S,

ferner nur während der Gasdruckdauer

das Kräftepaar $F_R \cdot d$.

Über den Einfluß des Drallmomentes, das hier nicht berücksichtigt ist, siehe S. 433, Berechnung der Schildzapfenkraft S.

Ausgleicherkraft F_A

Der Ausgleicher dient dazu, das Gewichtskraftmoment der höhenrichtbaren Teile in bezug auf den Schildzapfen bei allen Erhöhungen möglichst vollständig auszugleichen, so daß beim Höhenrichten, wobei die Bremsrückstoßkraft K und das Moment $F_R \cdot d$ wegfallen, nur eine kleine Richtmaschinenkraft F_W aufzubringen ist.

Berechnung der Richtmaschinenkraft F_W beim Schuß

Bei vollständigem Gewichtsausgleich vor dem Schuß muß die Richtmaschinenkraft beim Schuß folgende Momente ausgleichen:

1. das Moment $K \cdot d_{KS}$ der Bremskraft um die Schildzapfen,
2. das Kräftepaar $F_R \cdot d$ (während der Gasdruckdauer),
3. das aus der Verschiebung des Rücklaufgewichtes entstehende Moment (maximal $G_R \cdot \rho \cdot \cos \epsilon$) (vgl. Bild 929).

Das Moment $K \cdot d_{KS}$ kann ohne Schwierigkeit durch konstruktive Maßnahmen zum Verschwinden gebracht werden, indem man den Schildzapfen in die Wirkungslinie von K legt, d.h. d_{KS} zu Null macht.

Die *Lage der Rohrbremse und des Vorholers ist ohne Einfluß* auf die Richtmaschinenkraft. Da zum Beispiel bei Anordnung einer einzelnen Rohrbremse unter dem Rohr die Flüssigkeitsbremskraft mit einem erheblichen Hebelarm in bezug auf den Schildzapfen angreift, ist diese Tatsache bei oberflächlicher Betrachtung zunächst überraschend. Während, wie bereits dargelegt wurde, H und F_V bei Betrachtung des Gleichgewichtes am Gesamtsystem Rohr-Rohrwiege als innere Kräfte wegfallen, treten sie für *einen* dieser Teile, z.B. die Rohrwiege, allerdings in Erscheinung und beeinflussen durch ihre Lage zum Beispiel die Biegungsbeanspruchung dieses Teiles.

Um das Kräftepaar $F_R \cdot d$ klein zu halten, ist es bei der erheblichen Größe der Gaskraft F_R wichtig, daß der Abstand d des Schwerpunktes der rücklaufenden Teile von der Seelenachse möglichst klein ist. Zulässig sind im Normalfall nur einige mm.

Berechnung der Schildzapfenkraft S

Die Schildzapfenkraft S, unter der hier die Summe der auf beide Schildzapfen wirkenden Kräfte verstanden sein soll, kann nach Größe und Richtung aus der Bedingung ermittelt werden, daß sie mit den übrigen äußeren Kräften, d. h. mit K, G_R, G_W, F_W und F_A im statischen Gleichgewicht stehen muß.

Unabhängig davon müssen die Schildzapfen bei einem gezogenen Rohr während der Gasdruckdauer noch das Drallmoment M_d aufnehmen. Dies geschieht nach Bild 928 durch ein Kräftepaar $\Delta S \cdot b$, das in der Ebene senkrecht zur Seelenachse wirkt.

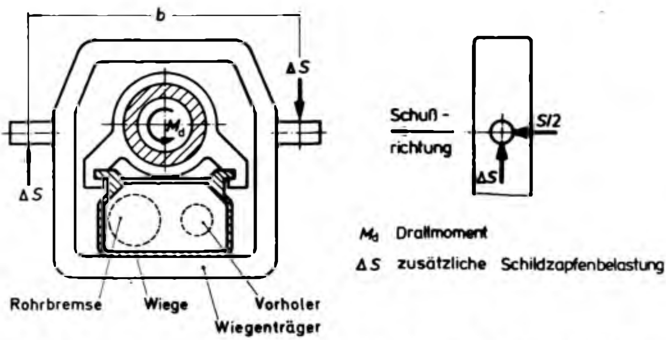


Bild 928. *Aufnahme des Drallmomentes durch die Schildzapfen.*

Die zusätzliche Schildzapfenbelastung ΔS ist vektoriell mit der von der Bremskraft K herrührenden Schildzapfenbelastung S/2 zusammenzusetzen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Höchstwerte der vom Drall und von der Bremskraft herrührenden Schildzapfenbelastungen zeitlich nicht zusammenfallen, so daß im allgemeinen die Höchstbeanspruchung der Schildzapfen durch den Dralleinfluß, der mit Geschoßaustritt völlig aufhört, nicht gesteigert wird.

Beispiel: 105-mm-Haubitze (wie S. 389)

Max. Drallmoment $\hat{M}_d = 7{,}19$ kNm,

Schildzapfenabstand $b = 0{,}35$ m;

somit $(\Delta S)_{max} = \frac{7{,}19}{0{,}35} = 20{,}5$ kN.

Zum Vergleich (s.S. 399):

$$S/2 \approx \overline{K}/2 = 57 \text{ kN}.$$

9.9.3. Kräfte am gesamten Geschütz

Die Überlegungen, die zur Ermittlung der am System Rohr-Rohrwiege wirkenden Kräfte angestellt wurden, gelten sinngemäß auch für die weiteren Baugruppen, z.B. die Oberlafette, und für das gesamte Geschütz. Als äußere, vom Schuß herrührende Kräfte am gesamten System sind demnach jeweils nur die Bremsrückstoßkraft K und während der Gasdruckdauer das Kräftepaar $F_R \cdot d$ einzusetzen. Neben den übrigen Gewichtskräften ist auch die Gewichtskraft der rücklaufenden Teile und deren Verschiebung durch den Rücklauf zu berücksichtigen (s. Bild 929).

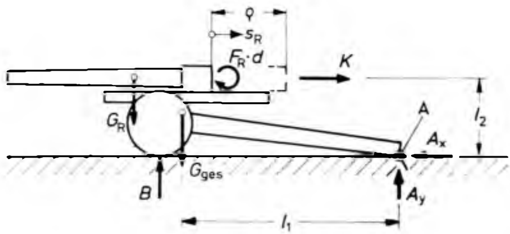
Im allgemeinen wird durch die Seitenrichtmaschine der die höhenrichtbaren Teile aufnehmende obere Teil der Lafette um den sogenannten Pivotzapfen gedreht, der auch als Drehkranz ausgebildet sein kann. Entsprechend wie bei der Höhenrichtmaschine ist für die Belastung der Seitenrichtmaschine beim Schuß nicht die seitliche Lage von Rohrbremse und Vorholer, sondern nur die seitliche bzw. mittige Lage der Bremsrückstoßkraft K maßgebend.

Durch die elastische Nachgiebigkeit der Lafette kann während der Bremsdauer entsprechend Bild 916, Fall A, eine Schwingung eingeleitet werden, die eine Erhöhung der Kräfte und Werkstoffbeanspruchungen zur Folge hat. Überschläglich wird der Schwingungseinfluß dadurch berücksichtigt, daß man die statisch berechneten Kräfte und Spannungen mit einem dynamischen Faktor von 1,5 bis 2 multipliziert.

Manche Teile der Lafette werden im übrigen durch die Stoßbelastung beim Fahren, wobei etwa mit einem Stoßfaktor 3 zu rechnen ist, höher belastet als beim Schuß.

9.10. Standfestigkeit des Geschützes beim Schuß

9.10.1. Standfestigkeit von Rädergeschützen



$G_R = m_R g$	Rücklaufgewichtskraft	F_R	Gaskraft
$G_{ges} = m_{ges} g$	Gesamtgewichtskraft	d	Abstand Schwerpunkt-Seelenachse
K	Bremsrückstoßkraft	s_R	Rücklaufweg
A_x, A_y, B	Auflagerkräfte	ρ	gesamter Rücklaufweg

Bild 929. *Rädergeschütz bei horizontalem Schuß.*

Beim Rädergeschütz wird die Horizontalkomponente der Bremsrückstoßkraft durch einen Sporn, bzw. bei Spreizlafetten durch zwei Sporne, aufgenommen (s. Bild 929). Die Auflagerkraft B an den Rädern ergibt sich aus den Momenten sämtlicher äußerer Kräfte um den Drehpunkt bzw. die Drehachse A. Da B nur als Druckkraft auftreten kann, heben sich die Räder vom Boden ab, d. h. das Geschütz „springt", wenn das bei kleinen Erhöhungen im Uhrzeigersinn drehende Moment der Bremsrückstoßkraft K größer ist als das Moment der im Gesamtschwerpunkt angreifenden Geschützgewichtskraft G_{ges}. In Bild 929 ist zur Vereinfachung der Sonderfall des Horizontalschusses dargestellt.

Zu Beginn des Rücklaufes wirkt noch das Gaskraftmoment $F_R \cdot d$ (s. S. 432), und die Stabilitätsbedingung lautet

$$K \cdot l_2 + F_R \cdot d < G_{ges} \cdot l_1 . \tag{96}$$

Während des Rücklaufs ist die Änderung des Gewichtsmomentes durch die Verschiebung des Rücklaufgewichtes zu berücksichtigen, so daß die Stabilitätsbedingung

$$K \cdot l_2 < G_{ges} \cdot l_1 - G_R \cdot s_R \tag{97}$$

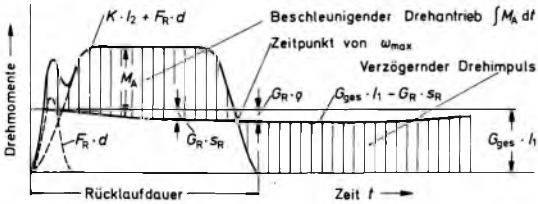
gilt, wobei s_R am Ende des Rücklaufs den Wert ρ erreicht.

Bei Instabilität wird der Geschützmasse mit dem Massenträgheitsmoment J_A (in bezug auf die Drehachse A) während der Rücklaufdauer ein begrenzter Drehantrieb $\int M_A dt$ (um die Drehachse A) zugeführt, dem nach der Impulsgleichung

$$J_A \cdot \omega = \int M_A dt \tag{98}$$

in jedem Augenblick eine bestimmte Drehgeschwindigkeit ω entspricht. Nach Bremskraftende wird durch das mit entgegengesetztem Vorzeichen wirkende Drehmoment von G_{ges} der Drehimpuls aufgezehrt.

Die *Sprunghöhe* kann an Hand eines Impulsdiagramms nach Bild 930 berechnet werden. Der zugeführte Drehimpuls ergibt sich aus dem zeitlichen Verlauf des Gaskraftmomentes $F_R \cdot d$, des Bremskraftmomentes $K \cdot l_2$ und des Gewichtsmomentes $G_{ges} \cdot l_1 - G_R \cdot s_R$ (s_R = Rücklaufweg). Die verhältnismäßig kleine Beschleunigungskraft, die während des Vorlaufes auf die Rücklaufmassen einwirkt, sei hier vernachlässigt.



Bezeichnungen s. Bild 929

Bild 930. *Impulsdiagramm beim Springen eines Geschützes.*

Näherungsweise erhält man die Sprunghöhe h des Gesamtschwerpunktes aus der Energiegleichung

$$G_{ges} \cdot h = J_A \cdot \omega_{max}^2/2, \tag{98a}$$

wobei ω_{max} nach Bild 930 und Gleichung (98) aus dem beschleunigenden Drehantrieb zu berechnen ist.

Für den ungünstigsten Fall der Erhöhung, d.h. für den Horizontalschuß oder für einige Grad Senkung, wird im allgemeinen eine gewisse Sprunghöhe (z.B. 10 cm) in Kauf genommen.

Bei *Spreizlafetten* ist auch die Stabilität beim Schießen mit großem Seitenrichtwinkel zu prüfen. Dabei ist zu beachten, daß sich die Verhältnisse je nach dem System der Spreizlafette wesentlich unterscheiden. Grundsätzlich wird bei jeder Spreizlafette die praktisch unbrauchbare Vierpunktauflagerung (2 Räder, 2 Sporne) durch ein Ausgleichsystem in eine Dreipunktauflagerung umgewandelt (Bild 931).

Beim System 1 ist die Unterlafette in den Punkten A_l, A_r und B gelagert. Das Geschützgewicht wirkt ebenso wie in Bild 929 mit dem Hebelarm l_1 in bezug auf die Kippkante zwischen den beiden Spornen.

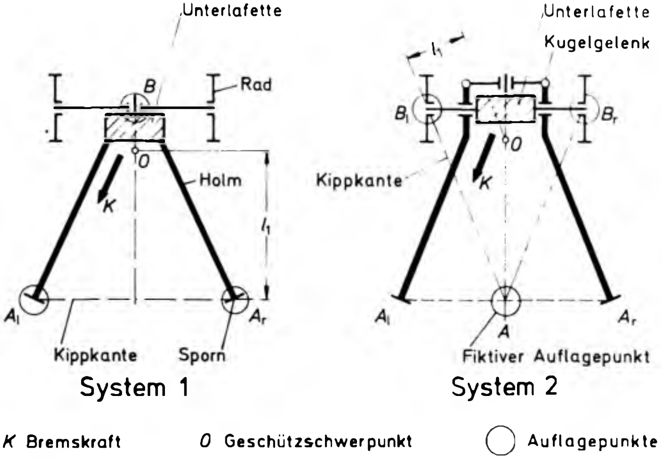


Bild 931. *Spreizlafettensysteme mit Dreipunktauflagerung.*

Beim System 2 folgt aus der Hebelverbindung zwischen den Holmen, daß die vertikalen Auflagerkräfte A_{ly} und A_{ry} in jedem Fall gleich groß sind. Das statische Verhalten ist daher ebenso, als ob die Auflagerkraft $A_y = A_{ly} + A_{ry}$ in der Mitte zwischen den beiden Spornen wirken würde, d.h. als ob dort neben den beiden Radauflagepunkten B_l und B_r der dritte Auflagepunkt A wäre. Dementsprechend verlaufen die Kippkanten zwischen A und B_l bzw. A und B_r, wobei der Hebelarm l_1 der Gewichtskraft erheblich kleiner ist als beim System 1.

Zu beiden Systemen gibt es verschiedene Ausführungsformen mit der grundsätzlich gleichen Lage der Auflagepunkte.

9.10.2. Standfestigkeit von Selbstfahrlafetten und Kampfpanzern

a) Verrutschen des Fahrzeuges

Bei Kampfpanzern und oftmals auch bei Selbstfahrlafetten wird auf das Eintreiben von Spornen in das Erdreich verzichtet. Die horizontale Belastung der Lafette beim Schuß muß dann ausschließlich durch die Reibungskraft zwischen Fahrzeug und Boden aufgenommen werden.

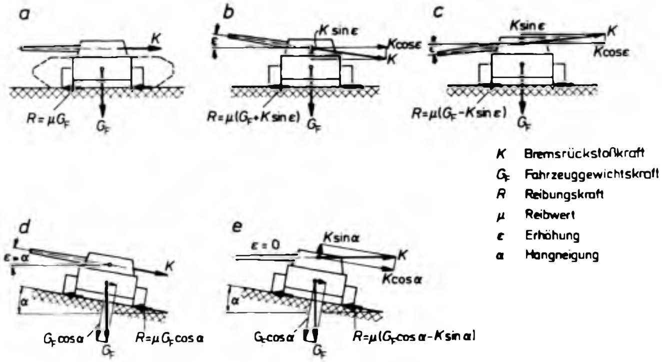


Bild 932. *Kräfte am Fahrzeug beim Verrutschen.*

Die gesamte Reibungskraft R = μN, die an beiden Ketten übertragen werden kann, hängt außer von der gesamten Belastung N senkrecht zum Boden vom Reibwert μ zwischen Kette und befahrenem Untergrund ab. Erfahrungsgemäß liegt der Reibwert μ zwischen 0,5 (nasser Lehmboden) und 1,4.

Bild 932 zeigt verschiedene Fälle der Rohrerhöhung und der Hangneigung. In den für die Reibungskraft R = μN eingetragenen Formeln ist die Normalkraft N jeweils abhängig von der Fahrzeuggewichtskraft G_F und der Bremsrückstoßkraft K berechnet. Im allgemeinen wird die Haftreibungskraft überschritten, so daß das Fahrzeug beim Schuß verrutscht.

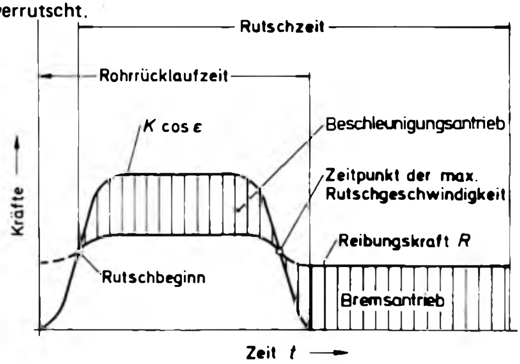
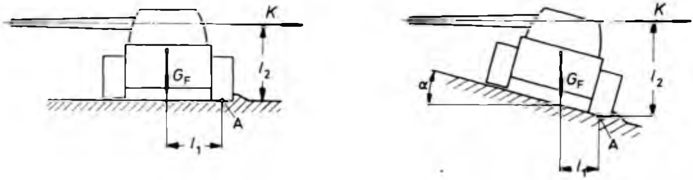


Bild 933. *Kraftverlauf beim Rutschvorgang (im Fall b von Bild 932).*

Die Größe des Rutschweges kann nach Bild 933 aus den auf das Fahrzeug wirkenden Antrieben, und zwar dem Beschleunigungsantrieb und dem Bremsantrieb, abhängig von der Zeit berechnet werden. Bei Kampfpanzern beträgt der Rutschweg auch unter ungünstigen Verhältnissen nur wenige cm.

b) Kippen des Fahrzeugs

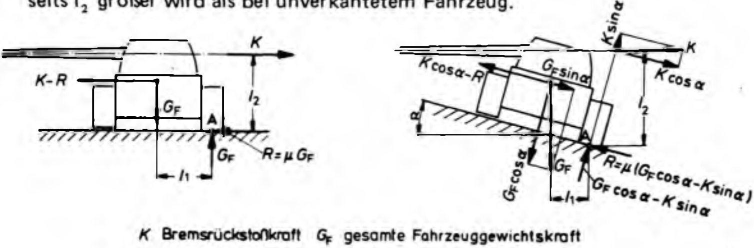


K Bremsrückstoßkraft G_F gesamte Fahrzeuggewichtskraft

Bild 934. *Selbstfahrlafette (Kampfpanzer) beim Schuß querab (Gleisketten seitlich abgestützt).*

Wenn durch Bodenunebenheiten ein Verrutschen des Fahrzeuges verhindert wird (Bild 934), lautet bei blockierter Radfederung die Stabilitätsbedingung ebenso wie im Fall des Rädergeschützes (s. Gleichung (96) bzw. (97)). Entsprechend kann nach Bild 930 die Sprunghöhe untersucht werden.

Besonders ungünstig ist der in Bild 934 rechts dargestellte Fall mit seitlich verkantetem Fahrzeug, da hier einerseits l_1 kleiner und anderseits l_2 größer wird als bei unverkantetem Fahrzeug.



K Bremsrückstoßkraft G_F gesamte Fahrzeuggewichtskraft

R Reibungskraft μ Reibwert

Bild 935. *Selbstfahrlafette (Kampfpanzer) beim Schuß querab (Gleisketten seitlich gleitend).*

Im allgemeinen wird gerade in der ungünstigsten Schußstellung, d.h. beim horizontalen Schuß querab, und namentlich bei gleichzeitiger Verkantung des Fahrzeugs (Bild 935) durch ein seitliches Gleiten der Gleisketten die Neigung zum Kippen des Fahrzeugs erheblich verringert.

Wie das Kräfteschema in Bild 935 zeigt, greift am Schwerpunkt des wegrutschenden Fahrzeugs eine Massenträgheitskraft K − R bzw. K cos α − R an, deren Drehmoment um die Kippkante A dem Moment der Bremsrückstoßkraft K entgegenwirkt.

9.11. Berechnungen zur Rücklaufeinrichtung

9.11.1. Aufbau der Bremskraft im Kraft-Weg-Diagramm

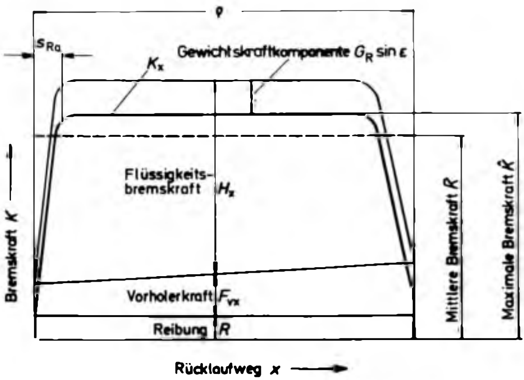


Bild 936. *Bremskraftverlauf.*

Bei der Berechnung der Rohrbremse ist von der nach den Abschnitten 9.6.3, 9.6.4 und 9.8 berechneten gesamten Bremskraft K auszugehen, die sich nach Abschnitt 9.9.1, Gleichung (94), aus mehreren Anteilen zusammensetzt.

Im allgemeinen strebt man eine längs des Rücklaufweges konstante Bremskraft K an, wobei jedoch am Anfang und am Ende des Rücklaufs ein gewisser Anstieg bzw. Abstieg der Kurve vorgesehen werden muß, damit nicht durch Fertigungsungenauigkeiten oder kleine Überschreitungen der normalen Rücklaufwucht Bremskraftspitzen hervorgerufen werden.

Wie bereits in Abschnitt 9.6.3, Gleichung (44), dargelegt wurde, wird praktisch ein Ungleichförmigkeitsgrad

$$\hat{K}/\bar{K} = 1{,}1 \text{ bis } 1{,}2$$

erreicht.

Während längs des Rücklaufweges (Bild 936) die Gewichtskraftkomponente $G_R \sin \epsilon$ und näherungsweise auch die gesamte in der Rücklaufeinrichtung auftretende Reibungskraft R konstant sind, verändern sich die Vorholerkraft F_{vx}, die Flüssigkeitsbremskraft H_x und die gesamte Bremskraft K_x abhängig vom Rücklaufweg x.

Bei vorgegebenem Verlauf der Größen K_x, R und F_{vx} und bei gegebenem G_R und ϵ kann die erforderliche Flüssigkeitsbremskraft

$$H_x = K_x - F_{vx} - R + G_R \sin \epsilon \qquad (99)$$

abhängig vom Rücklaufweg x aus dem Diagramm entnommen werden.

Erfahrungsgemäß beträgt bei normalen Geschützen die Reibungskraft R etwa 3 bis 7 % der Bremskraft K.

9.11.2. Die Flüssigkeitsbremskraft

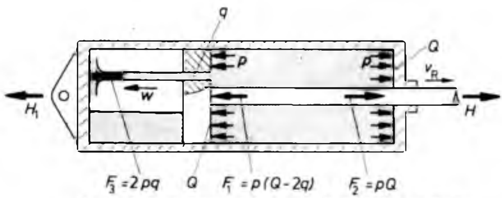


Bild 937. *Hydraulische Bremse (schematisch).*

Grundsätzlich kann eine Flüssigkeitsbremskraft nach dem schematischen Bild 937 in einem flüssigkeitsgefüllten Zylinder dadurch erzeugt werden, daß ein mit den rücklaufenden Massen verbundener Kolben beim Rücklauf die verdrängte Flüssigkeit durch einen engen Durchflußquerschnitt preßt. Auch bei Annahme einer reibungslosen Strömung ergibt sich eine Druckerhöhung aus der Tatsache, daß die vor dem Kolben mit der wirksamen Kolbenfläche Q in Ruhe befindlichen Flüssigkeitsteilchen im Durchflußquerschnitt q auf die Strömungsgeschwindigkeit relativ zum Kolben

$$w_r = v_R \cdot Q/q \qquad (100)$$

beschleunigt werden. Zur Ermittlung der wirksamen Kolbenfläche ist von der vollen Kolbenfläche nur der Kolbenstangenquerschnitt, nicht aber der Durchflußquerschnitt, abzuziehen. Für die absolute Strömungsgeschwindigkeit gilt

$$w = w_r - v_R = v_R\left(\frac{Q}{q} - 1\right)$$

oder, wenn man die Größe $\nu = q/Q$ einführt,

$$w = \frac{1-\nu}{\nu}\, v_R. \qquad (100a)$$

Die in einem Zeitelement dt der Flüssigkeit zugeführte kinetische Energie dE ist offenbar gleich der kinetischen Energie der in der Zeit dt vom Kolben verdrängten und mit der absoluten Geschwindigkeit w in das Vakuum hinter dem Kolben (s. Abschnitt 9.13.1, S. 450 ausströmenden Flüssigkeitsmenge $Q\, v_R\, dt$, d. h.

$$dE = Q\, v_R\, dt \cdot \frac{\rho_{Fl}\, w^2}{2} = Q\, v_R\, dt\, \frac{\rho_{Fl}\,(1-\nu)^2}{2\nu^2}\, v_R^2 \qquad (101)$$

wobei ρ_{Fl} die Dichte der Flüssigkeit bedeutet.

Im gleichen Zeitelement wird über die mit der Flüssigkeitsbremskraft H belastete Kolbenstange die Arbeit

$$dA = H\, v_R\, dt \qquad (102)$$

zugeführt. Aus der Energiegleichung dA = dE folgt

$$H = Q\,\frac{\rho_{Fl}}{2} \cdot \frac{(1-\nu)^2}{\nu^2}\, v_R^2 = (1-\nu)^2\,\frac{\rho_{Fl}\, Q^3}{2q^2}\, v_R^2. \qquad (103)$$

Berücksichtigt man die durch Flüssigkeitsreibung und durch Einschnürung des Flüssigkeitsstrahls bewirkte Erhöhung des theoretischen Wertes von H durch einen empirischen Strömungsfaktor ξ, so gilt

$$H = \frac{(1-\nu)^2}{\xi} \cdot \frac{\rho_{Fl}\, Q^3}{2q^2}\, v_R^2. \qquad (104)$$

Nach der Theorie der reibungsfreien Strömung [4] ergibt ein mit dem Überdruck p und dem Strahlquerschnitt q ausströmender Strahl an der benachbarten Wandung einen Ausfall an Wandungsdruck, der dem doppelten Querschnitt q entspricht. Die gesamte Flüssigkeitskraft am Kolben, die in der Größe mit der entgegengesetzt gerichteten Zugkraft H an der Kolbenstange übereinstimmt, ist somit

$$F_l = p\,(Q - 2q) = H.$$

Damit gilt für den Flüssigkeitsdruck

$$p = \frac{H}{Q - 2q} = \frac{H}{Q(1-2\nu)}. \qquad (104a)$$

Bei Betrachtung des Kräftegleichgewichts am Bremszylinder (Bild 937) ist nicht nur die auf den Deckel des Bremszylinders wirkende Kraft $F_2 = p\,Q$ zu berücksichtigen, sondern auch die auf den Zylinderboden wirkende Strahldruckkraft

$$F_3 = \rho_{Fl}\, q w^2 .$$

Mit der Ausflußformel $w = \sqrt{2p/\rho_{Fl}}$ erhält man

$$F_3 = 2\,p\,q\,.$$

Somit gilt für die Kraft H_1 an der Zylinderaufhängung, die im Gleichgewicht ist mit den Flüssigkeitskräften;

$$H_1 = F_2 - F_3 = p\,(Q - 2q) = H\,,$$

d. h. die Kraft an der Zylinderaufhängung ist ebenso groß wie die Kolbenstangenkraft H. Solange die Strömungsvorgänge im Inneren des Zylinders als stationär oder quasistationär betrachtet werden können, folgt dies von vorneherein aus der Gleichgewichtsbedingung für das Massensystem Zylinder – Flüssigkeit – Kolben.

Gleichung (104) für die Flüssigkeitsbremskraft gilt also sowohl bei feststehendem Zylinder und mit dem Geschützrohr zurücklaufender Kolbenstange als auch bei feststehender Kolbenstange und zurücklaufendem Zylinder (s. Abschnitt 9.12, S. 450).

Gleichung (104) ist auch unabhängig davon, ob der Durchflußquerschnitt innerhalb der wirksamen Kolbenfläche (Bild 937) oder in der Zylinderwandung (Bild 941a) oder innerhalb der Kolbenstange (Bild 941b) liegt.

Durch entsprechende konstruktive Ausführung (s. Abschnitt 9.12) kann der Durchflußquerschnitt abhängig vom Rücklaufweg x veränderlich gestaltet werden. Da sich auch v_R abhängig von x ändert, berechnet man die mit x veränderliche Flüssigkeitsbremskraft nach der Gleichung

$$\boxed{H_x = \frac{(1-\nu_x)^2}{\xi} \cdot \frac{\rho_{Fl}\, Q^3}{2q_x^2}\, v_{Rx}^2 .} \qquad (105)$$

wobei ξ = 0,6 bis 0,8.

Da $\nu_x = q_x/Q$ auf 5 bis 10% ansteigen kann, ist der Faktor $(1 - \nu_x)^2$ nicht ohne weiteres zu vernachlässigen, wie es nach früheren Berechnungsverfahren |1|, |2|, |3| üblich war.

Die Größe des Strömungsfaktors ξ hängt von der Viskosität der Bremsflüssigkeit und von der Form der Durchflußkanäle ab. Bei

strömungstechnisch günstig ausgebildeter Form kann der obere Wert von ξ eingesetzt werden.

Bemerkenswert ist, daß nach obigem die Flüssigkeitsbremskraft erheblich mehr von der Dichte als von der Viskosität der Bremsflüssigkeit abhängt.

Wenn nach der im Abschnitt 9.11.1 beschriebenen Untersuchung der gewünschte Verlauf von H_x gegeben ist, und wenn nach der im folgenden dargestellten Methode auch der Verlauf von v_{Rx} bekannt ist, kann der erforderliche Verlauf des Durchflußquerschnittes aus Gleichung (105) berechnet werden.

Mit Einführung des Zwischenwertes

$$q_{ox} = Q\sqrt{\frac{\rho_{Fl} \cdot Q}{2\xi}} \cdot \frac{v_{Rx}}{\sqrt{H_x}} \qquad (106)$$

erhält man den erforderlichen Durchflußquerschnitt

$$q_x = q_{ox}\,\frac{Q}{Q + q_{ox}}. \qquad (106a)$$

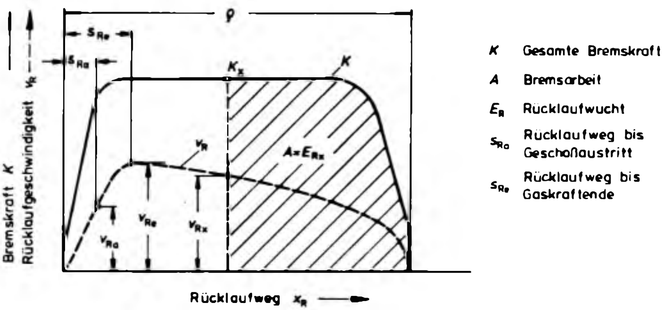


Bild 938. *Ermittlung der Rücklaufgeschwindigkeit abhängig vom Rücklaufweg.*

Zur Ermittlung des Verlaufes von v_{Rx} können zunächst unter Annahme einer Anfangsbremsung mit entsprechender mittlerer Bremskraft die Werte v_{Ra} bei Geschoßaustritt und v_{Re} bei Gaskraftende berechnet und in das Diagramm Bild 938 eingetragen werden. Zur Berechnung der Geschwindigkeit v_{Rx} nach einem beliebigen Rücklaufweg x_R geht man zweckmäßigerweise von der Bremsarbeit $A = \int K dx_R$ aus, die während des restlichen Rücklaufweges die an der Stelle x_R noch vorhandene Rücklaufwucht E_{Rx} verzehrt, so daß $A = E_{Rx}$ gilt. Die Größe E_{Rx} kann somit aus dem Diagramm Bild 938 durch Planimetrieren der schraffierten Fläche gewonnen werden.

Aus $E_{Rx} = m_R\, v_{Rx}/2$

folgt $$v_{Rx} = \sqrt{\frac{2 E_{Rx}}{m_R}} \qquad (107)$$

Zur Berechnung der Durchflußquerschnitte ist dieser Wert zusammen mit dem nach Gleichung (99) ermittelten Wert

$$H_x = K_x - F_{vx} - R + G_R \sin \epsilon$$

in Gleichung (106) einzusetzen.

Die rechnerische Festlegung des Verlaufs der Durchflußquerschnitte längs des Kolbenweges erfolgt im allgemeinen für größte Ladung und größte Erhöhung.

Beim Schießen mit kleiner Ladung und somit kleinerem v_{Re} nimmt die abzubremsende Wucht, d.h. die gesamte erforderliche Diagrammfläche $\int K dx_R$ proportional v_{Re}^2 ab. Ebenso nimmt bei unveränderter Rohrbremse die tatsächlich erzeugte Flüssigkeitsbremskraft H_x, also der Hauptanteil der Bremskraft K_x, proportional v_R^2 ab. Infolgedessen verkürzt sich der gesamte Rücklaufweg ρ beim Schießen mit kleineren Ladungen nur sehr wenig.

9.11.3. Die Vorholerkraft

Der Vorholer soll das zurückgelaufene Rohr wieder in die Schußstellung, d.h. in die Anfangslage, vorholen. Dabei sind während des Vorlaufs zu überwinden:

1) Die Komponente $G_R \sin \epsilon = m_R\, g \sin \epsilon$ der Rücklaufgewichtskraft,
2) die Reibung R,
3) gegebenenfalls die Spannkraft eines Verschlußbewegers oder sonstiger Ladeeinrichtungen.

Zur Vermeidung zu harten Anschlagens in der Anfangslage muß mindestens im letzten Teil des Vorlaufs eine zusätzliche Vorlaufbremsung wirksam werden. Eine genaue Untersuchung des gesamten Vorlaufs muß ebenso wie beim Rücklauf auf einer Energiebetrachtung aufbauen.

Unabhängig davon muß aber, damit die Anfangslage mit Sicherheit erreicht und beibehalten wird, die Vorholerkraft in dieser Lage auch rein statisch ausreichen, um Gewichtskomponente und Reibung zu überwinden.

Für die Reibung kann in diesem Fall die Gleitbahnreibung

$$R = \mu G_R \cos \epsilon$$

eingesetzt werden.

Die erforderliche Mindestkraft des Vorholers in der Anfangslage (Bild 939), d.h. die Vorspannkraft, beträgt also

$$F_{vo} = G_R (\sin \epsilon + \mu \cos \epsilon) \tag{108}$$

oder, wenn man noch einen Sicherheitsbeiwert k einschaltet,

$$F_{vo} = k\, G_R (\sin \epsilon + \mu \cos \epsilon). \tag{109}$$

Dabei wird zweckmäßigerweise

$$k = 1{,}2 \text{ bis } 1{,}5$$

und $\mu = 0{,}2$ gewählt.

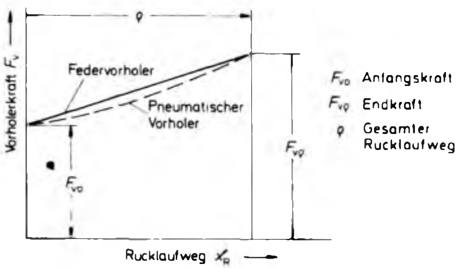


Bild 939. *Verlauf der Vorholerkraft.*

Je nachdem, ob die Vorholerkraft durch Federn oder in einem pneumatischen Druckzylinder erzeugt wird, steigt die Kraft während des Rohrrücklaufs (Bild 939) linear oder nach einer progressiv ansteigenden Kurve auf die Endkraft $F_{v\rho}$ an.

Im allgemeinen ist ein möglichst flacher Anstieg der Vorholerkraft erwünscht, da sonst dem Rohr beim Vorlauf eine unnötig große Vorlaufwucht erteilt wird, die erst wieder mit besonderen Mitteln abgebremst werden muß.

Üblich ist ein Kraftverhältnis

$$m = \frac{F_{v\rho}}{F_{vo}} \approx 1{,}5 \text{ bis } 2. \tag{110}$$

Bei *Federvorholern* muß für ein Kraftverhältnis m = 2 die Feder bzw. das Federsystem mit einem Vorspannweg $x_V = \rho$ und für m = 1,5 sogar mit einem Vorspannweg $x_V = 2\rho$ vorgespannt werden.

In *pneumatischen* Vorholern kann durch Wahl des anfänglichen Fülldruckes bei der Füllung mit Luft oder Stickstoff die gewünschte Vorspannkraft erzeugt werden. Bild 940 zeigt schematisch die Wirkungsweise eines üblichen Vorholers, wobei es für den Kraftverlauf keine Rolle spielt, ob das Gas im Speicherraum mit der als Übertragungs- und Dichtmittel verwendeten Flüssigkeit unmittelbar oder über eine Membran bzw. einen fliegenden Kolben in Verbindung steht.

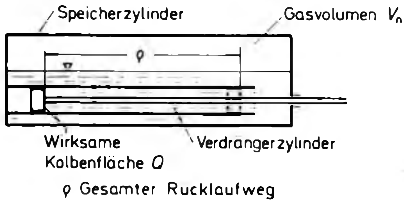


Bild 940. *Pneumatischer Vorholer (schematisch).*

Während des Rohrrücklaufs wird das Gas polytropisch vom Anfangsvolumen V_0 auf das Endvolumen V_ρ komprimiert, wobei unter üblichen Verhältnissen mit dem Polytropenexponenten n = 1,3 gerechnet werden kann.

Es gilt somit

$$p\,V^{1,3} = \text{const}, \tag{111}$$

wobei zu beachten ist, daß p nicht der mit dem Manometer gemessene Überdruck $p_ü$ gegenüber der freien Atmosphäre, sondern der absolute Druck $p_{abs} = p_ü + 1$ bar ist.

Anderseits ist die Vorholerkraft

$$F_{v0} = p_{0ü}\,Q \tag{112}$$

bzw.

$$F_{v\rho} = p_{\rho ü}\,Q \tag{113}$$

mit den Überdrücken $p_ü$ zu berechnen.

Aus Gleichung (111) folgt für das Verhältnis des absoluten Enddruckes p_ρ zum absoluten Anfangsdruck p_0

$$p_\rho/p_0 = (V_0/V_\rho)^{1,3} \tag{114}$$

oder mit $V_\rho = V_0 - Q \cdot \rho$

$$p_\rho/p_0 = \left(\frac{V_0}{V_0 - Q \cdot \rho}\right)^{1,3} . \qquad (115)$$

Ein Druckverhältnis $p_\rho/p_0 = 1{,}5$ wird erreicht,

wenn $\frac{V_0}{V_0 - Q \cdot \rho} = 1{,}37$

oder $V_0 \approx 3{,}7\ Q \cdot \rho$,

d. h. das Speichervolumen muß etwa das 3,7fache des beim Rücklauf verdrängten Flüssigkeitsvolumens betragen.

Üblich ist ein Anfangsdruck $p_0 \approx$ 30 bis 70 bar.

Die polytropische Erwärmung des Gases beim Rücklauf, die beim Vorlauf wieder zurückgeht, ist praktisch nicht von Bedeutung, da bei einem Druckverhältnis $m < 2$ die Temperatursteigerung $\Delta T <$ 60 K ist.

9.12. Grundsätzlicher Aufbau üblicher Rohrbremsen

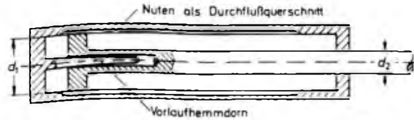
Bild 941 zeigt schematisch einige häufig vorkommende Bremsensysteme[1]. Grundsätzlich kann der nach Abschnitt 9.11.2 geforderte veränderliche Durchflußquerschnitt entweder durch Nuten veränderlicher Breite bzw. Tiefe (Bild 941a und c) oder durch einen Ringspalt mit veränderlichem Innen- bzw. Außendurchmesser (Bild 941b und d) erreicht werden. Bei Ausführung 941b entsteht der Ringspalt zwischen der hohlen Kolbenstange und einer feststehenden „Regelstange" veränderlichen Durchmessers. Die übliche Bezeichnung „Regelstange" widerspricht allerdings den heutigen Definitionen der Regeltechnik, da keine Regelung, sondern eine wegabhängige Steuerung vorliegt. Richtig wäre also die Bezeichnung „Steuerstange".

Ausführung 941c wird bei Haubitzen mit großem Erhöhungsbereich angewendet, um im oberen Winkelbereich den Rücklaufweg zu verkürzen. Dadurch ist es möglich, die Feuerhöhe, d.h. die Höhe der Schildzapfen über dem Boden, zu beschränken. Die mit dem kürzeren Rücklaufweg verbundene Steigerung der Bremskraft ist tragbar, da im oberen Winkelbereich die Verhältnisse sowohl in bezug auf Stabilität des Geschützes als auch in bezug auf die Beanspruchung einzelner Lafettenteile günstiger sind.

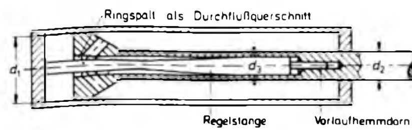
---

[1] Vgl. auch 8.2.1.4, Rohrbremsen und Rohrvorholer.

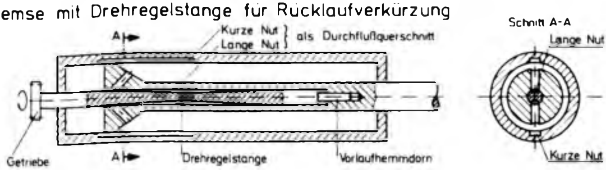
a Zügebremse mit Vorlaufhemmdorn



b Rohrbremse mit Regelstange und Vorlaufhemmdorn



c Rohrbremse mit Drehregelstange für Rücklaufverkürzung



d Konzentrische Rohrbremse

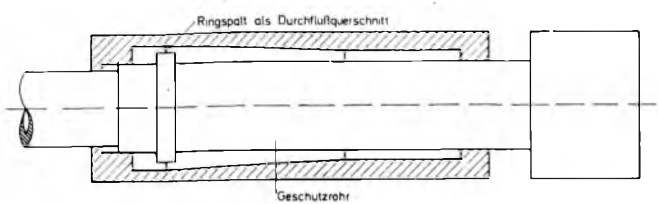


Bild 941. *Schematischer Aufbau üblicher Rohrbremsen.*

Die Verkürzung des Rücklaufweges erfolgt bei diesem System, indem von einer bestimmten Erhöhung an die Regelstange selbsttätig so gedreht wird, daß die langen, auf der Regelstange befindlichen Nuten allmählich abgedeckt werden, so daß nur noch die kurzen Nuten in der Zylinderwand wirksam sind.

Bei Ausführung 941d ist der Bremszylinder konzentrisch um das Geschützrohr angeordnet. Ein am Rohr angebrachter Flansch wirkt als Kolben.

Die Ausführungen a) bis c) weisen einen Vorlaufhemmdorn auf, der im letzten Teil des Vorlaufs in eine flüssigkeitsgefüllte Bohrung eintaucht und eine Vorlaufbremskraft erzeugt. Die Drosselung in den für den Rücklauf berechneten Durchflußquerschnitten ist bei den verhältnismäßig niedrigen Vorlaufgeschwindigkeiten wenig wirksam. Soweit eine weitere Vorlaufbremsung erforderlich ist, kann diese entweder im hydropneumatischen Vorholer vorgesehen werden oder durch eine besondere Ventilanordnung in der Rohrbremse erzeugt werden.

Für den Einbau einer Rohrbremse in die Lafette ist folgendes zu beachten:

Grundsätzlich wird die gleiche hydraulische Bremskraft erzeugt, wenn man bei feststehendem Zylinder den Kolben zurücklaufen läßt oder bei feststehendem Kolben den Zylinder zurücklaufen läßt.

Man unterscheidet also:

Ausführung A:
Zylinder an der Lafette (Wiege) befestigt, Kolbenstange mit dem Rohr zurücklaufend.

Ausführung B:
Kolbenstange an der Lafette befestigt, Zylinder mit dem Rohr zurücklaufend.

Obwohl mit der Ausführung B eine erwünschte Vergrößerung der rücklaufenden Massen verbunden ist, wird im allgemeinen aus konstruktiven Gründen, insbesondere wegen des größeren Raumbedarfs eines rücklaufenden Zylinders, der Ausführung A der Vorzug gegeben.

9.13. Einige besondere Probleme bei hydraulischen Bremsen

9.13.1. Entstehung eines Vakuums

Durch das aus dem Bremszylinder austretende Kolbenstangenvolumen (s. Bild 941a bis c) entsteht am Ende des Rücklaufs in der gezeichneten Darstellung links vom Kolben ein Vakuum von der Größe

$$V_{Vak} = \rho \cdot \frac{\pi d_2^2}{4} . \qquad (116)$$

Beim *Vor*lauf wird links vom Kolben nach einem Vorlaufweg x im Fall a (ohne Regelstange) der Raum $x \frac{\pi d_1^2}{4}$, im Fall b (mit Regelstange) der Raum $x(\frac{\pi d_1^2}{4} - \frac{\pi d_3^2}{4})$ ausgefüllt. Das Vakuum links vom Kolben ist also beseitigt, wenn

$$x \frac{\pi d_1^2}{4} = \rho \frac{\pi d_2^2}{4} \qquad \text{(Fall a)}$$

bzw. $$x \left(\frac{\pi d_1^2}{4} - \frac{\pi d_3^2}{4}\right) = \rho \frac{\pi d_2^2}{4} \qquad \text{(Fall b)}$$

ist, d.h. nach einem Vorlaufweg

$$x = \rho \frac{d_2^2}{d_1^2} \qquad \text{(Fall a)} \qquad (117)$$

bzw. $$x = \rho \frac{d_2^2}{d_1^2 - d_3^2} \qquad \text{(Fall b).} \qquad (118)$$

Erst von diesem Augenblick an kann die *Vorlauf*bremsung durch die rückströmende Flüssigkeit wirksam werden.

Der Rest des Vakuums, das erst bei Vorlaufende restlos ausgefüllt ist, befindet sich nun rechts vom Kolben. Dadurch entstehen beim Vorlauf besondere Anforderungen an die Kolbenstangendichtung, da gegen einen inneren Flüssigkeitsüberdruck von rd. 200 bar unter Umständen leichter abzudichten ist als gegen einen äußeren flüssigkeitslosen Überdruck von 1 bar.

Für die Berechnung der Bremskraft beim Rücklauf kann der Unterdruck von 1 bar auf der Kolbenrückseite vernachlässigt werden.

9.13.2. Einfluß der Erwärmung

Eine einfache Energiebetrachtung zeigt, daß am Ende des Rohrvorlaufs, wenn das Rohr zur Ruhe gekommen ist und die Vorholerkraft wieder auf die Vorspannkraft abgesunken ist, die gesamte kinetische Rücklaufenergie E_R in Wärme umgewandelt sein muß. Ausgenommen davon ist lediglich der Energieanteil, der gegebenenfalls zum Spannen eines Verschlußbewegers oder eines Kraftspeichers für eine Ladeeinrichtung verbraucht wird.

Die Umsetzung der kinetischen Energie in Wärme erfolgt überwiegend in der Rohrbremse bei der Rücklauf- und Vorlaufbremsung. Nur ein kleiner Anteil wird durch die Gleitbahnreibung beim Rück- und Vorlauf und gegebenenfalls durch eine Vorlaufbremsung im Vorholer umgesetzt. Für eine Überschlagsrechnung kann näherungsweise die je Schuß in der Rohrbremse erzeugte Wärme

$$E_W \approx E_{R0} \text{ (s. Gleichung (43))}$$

gesetzt werden.

Die zur Erwärmung der gesamten Rohrbremse um 1 K erforderliche Wärmeenergie in J ist

$$W_t = m_{St}\, c_{St} + m_{Fl}\, c_{Fl}; \tag{119}$$

darin bedeutet

m_{St} das Gewicht der Rohrbremse (ohne Flüssigkeit) in kg,

c_{St} die spezifische Wärme von Stahl (dem Hauptwerkstoff der Bremse) in kJ/kgK,

m_{Fl} das Gewicht der Bremsflüssigkeit in kg,

c_{Fl} die spezifische Wärme der Bremsflüssigkeit in kJ/kgK.

Berücksichtigt man den Wärmeverlust durch Strahlung und Wärmeleitung erfahrungsgemäß durch den Faktor 0,9, so lautet die Gleichung für die Temperaturzunahme der Rohrbremse in K (Kelvin) je Schuß

$$\Delta T = \frac{0{,}9\, E_W}{(m_{St}\, c_{St} + m_{Fl}\, c_{Fl})} \tag{120}$$

oder, wenn man vom Volumen V_{Fl} und der Dichte ρ_{Fl} der Bremsflüssigkeit ausgeht

$$\Delta T = \frac{0{,}9\, E_W}{(m_{St}\, c_{St} + V_{Fl}\, \rho_{Fl}\, c_{Fl})} \tag{121}$$

Dabei kann eingesetzt werden:

für Stahl $c_{St} = 0{,}48$ kJ/kgK,

für übliches Hydrauliköl $c_{Fl} = 2{,}10$ kJ/kgK,

und $\rho_{Fl} = 0{,}886$ kg/dm³

oder $\rho_{Fl} \cdot c_{Fl} = 1{,}86$ kJ/dm³ K.

Zur Berechnung der gesamten Temperaturzunahme bei größeren Schußfolgen ist die Abkühlung zwischen den einzelnen Schüssen zu berücksichtigen, die allerdings bei Kadenzen von mehreren Schuß je Minute verhältnismäßig gering ist.

Eine für die Funktion der Rohrbremse bedeutsame Folge der Erwärmung ist die Volumenzunahme der Bremsflüssigkeit:

$$\Delta V_{Fl} = \alpha_{Fl} \cdot \Delta T \cdot V_{Fl}; \tag{122}$$

darin ist α_{Fl} der räumliche Ausdehnungskoeffizient der Bremsflüssigkeit

und ΔT die gesamte Temperaturzunahme.

Für das übliche Hydrauliköl gilt

$$\alpha_{Fl} \approx 0{,}8 \cdot 10^{-3} \ K^{-1}.$$

Da der räumliche Ausdehnungskoeffizient von Stahl nur

$$\alpha_{St} \approx 0{,}03 \cdot 10^{-3} \ K^{-1}$$

beträgt, ist die Volumenzunahme des Bremszylinders für eine bestimmte Temperatur verschwindend gering gegenüber der Volumenzunahme der Bremsflüssigkeit. Die Volumenzunahme ΔV_{Fl} füllt zum Teil das Vakuum auf, so daß die vorlaufende Kolbenstange nicht mehr genügend Platz findet, um bis in die Anfangslage vorzulaufen. Die Folge ist, daß das Rohr nach dem Schuß theoretisch um eine Strecke

$$x = \frac{(\alpha_{Fl} - \alpha_{St})\, V_{Fl} \cdot \Delta T}{\pi d_2^2 /4}$$

zurückbleibt, wobei d_2 der Durchmesser der Kolbenstange ist.

Das Zurückbleiben des Rohres kann bis zu einer gewissen Grenze dadurch verhindert werden, daß dem Flüssigkeitsvolumen ein kleines Luftvolumen beigegeben wird, das unter dem Einfluß der überschüssigen Vorholerkraft (vgl. Gleichung (108))

$$\Delta F_{VO} = F_{VO} - G_R(\sin \epsilon + \mu \cos \epsilon)$$

am Ende des Vorlaufs komprimiert wird. Dabei wird allerdings durch die zunehmende Erwärmung des Luftpolsters ein Gegendruck erzeugt, der oberhalb einer kritischen Grenze den Vorlauf wieder behindert. Eine unmittelbar der Bremsflüssigkeit beigegebene Luftblase hat auch den Nachteil, daß, selbst wenn sie sich ursprünglich während des Rücklaufs im drucklosen Teil des Zylinders befindet, bereits nach dem ersten Schuß infolge der kräftigen Durchwirbelung ein Flüssigkeits-Luft-Gemisch den gesamten Zylinder erfüllt, wodurch bei weiteren Schüssen der Bremskraftverlauf nachteilig verändert wird.

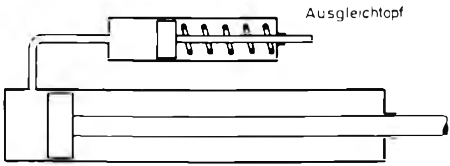


Bild 942. *Rohrbremse mit Flüssigkeits-Ausgleichtopf (schematisch).*

Zuverlässig kann die Wärmeausdehnung der Bremsflüssigkeit durch einen federbelasteten Ausgleichtopf (Bild 942) aufgenommen werden.

9.13.3. Verhalten einer Luftblase im Druckraum einer Rohrbremse

Die verhältnismäßig hohen Drücke von 200 bis 300 bar, die während des Rohrrücklaufs im Druckraum einer Rohrbremse auftreten, haben zur Folge, daß Luftblasen in der Bremsflüssigkeit bis weit über den Flammpunkt des Hydrauliköles, der bei 90° C liegt, erhitzt werden. Da die Druckerhöhung vom Atmosphärendruck auf den vollen Bremsdruck bereits zu Beginn des Rücklaufs, also sehr rasch, erfolgt, kann adiabatische Kompression des Luftvolumens angenommen werden.

Für das Verhältnis der absoluten Temperatur nach und vor der Kompression gilt dann

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}$$

und für das Verhältnis der Luftvolumen

$$V_1/V_2 = (p_2/p_1)^{\frac{1}{\kappa}},$$

wobei für Luft $\kappa = 1{,}40$ einzusetzen ist.

Beispielsweise erhält man für eine Drucksteigerung von $p_1 = 1$ bar auf $p_2 = 200$ bar

$$T_2/T_1 = 4{,}54,$$

d. h. bei einer Anfangstemperatur von 20° C = 293 K eine Endtemperatur von rd. 1060° C und ein Volumenverhältnis

$$V_1/V_2 = 44{,}0,$$

d.h., ein Anfangsvolumen von 100 cm³ würde auf 2,3 cm³ vermindert.

Bei der erreichten Temperatur von rd. 1060°C verbrennt mit Sicherheit der eingeschlossene Luftsauerstoff mit einer entsprechenden kleinen Menge Öl, wobei sich theoretisch ein Verbrennungsgasdruck von einigen hundert bar ergibt.

Praktisch wird, solange das eingeschlossene Luftvolumen nur einige Prozent des gesamten Flüssigkeitsvolumens beträgt, der maximale Gasdruck stark reduziert durch den Umstand, daß bei steigendem Druck einerseits das im Bremszylinder befindliche Hydrauliköl komprimiert wird und anderseits die Wandung des Bremszylinders sich dehnt, so daß eine erhebliche Expansion der verhältnismäßig kleinen Luftblase zustande kommt.

Ein weiterer Umstand, der dafür sorgt, daß die Druckerhöhungen im allgemeinen ungefährlich sind, ist der, daß die Verbrennung bereits bei verhältnismäßig niedrigen Drücken zu Beginn des Bremskraftanstieges einsetzt und vor Erreichen der vollen Bremskraft abgeschlossen ist. Infolgedessen kommt, wie Versuche gezeigt haben, im allgemeinen nur ein steilerer Anstieg des Bremskraftdiagrammes zustande, ohne daß eine den normalen Verlauf übersteigende Spitze auftritt. Die erwähnten Versuche wurden mit einer Bremse durchgeführt, aus der bis zu 10 % der Bremsflüssigkeit abgelassen wurden. Natürlich tritt der beschriebene Verpuffungsvorgang nur beim ersten Schuß auf, da bei den folgenden Schüssen die Gasblase keinen Sauerstoff mehr enthält.

Literatur

[1] Rausenberger, F.: Theorie der Rohrrücklaufgeschütze. Berlin 1939.

[2] Hänert, L.: Geschütz und Schuß. Berlin 1940.

[3] Füsgen, P.: Die Berechnung der Flüssigkeitsbremsen, insbesondere für Rohrrücklaufgeschütze. Wehrt. Monatsh. 1936, 2. Sonderh.

[4] Prandtl/Oswatitsch/Wieghardt: Führer durch die Strömungslehre. Braunschweig 1969.

[5] Oswatitsch, K.: Zwischenballistik. Deutsche Luft- u. Raumfahrt, Forschungsbericht 64 — 37 (1964).

Ferner:
Oerlikon-Taschenbuch. Zürich-Oerlikon 1956.

10. Geschütz- und Geschützturm-Prüfstände

10.1. Dynamische Geschützprüfstände

Dynamische Geschützprüfstände sind Einrichtungen, mit denen Geschütze oder deren Baugruppen unter simulierten Schußbelastungen dynamisch geprüft werden können. Von besonderer Bedeutung ist die Simulation der Rückstoßkräfte durch pulverbetriebene dynamische Geschützprüfstände, deren Aufbau und Wirkungsweise nachstehend beschrieben sind.

Die simulierten Rückstoßkräfte entsprechen darin sowohl der Größe als auch dem zeitlichen Verlauf nach den Verhältnissen beim echten Schuß. Der echte Schuß kann daher bei Versuchen meistens dann durch den simulierten Schuß ersetzt werden, wenn allein die Rückstoßwirkung auf die Rücklaufeinrichtungen und Lafetten untersucht werden soll.

Bekanntlich wird beim echten Schuß über 90 % der Arbeit der Pulvergase für die Beschleunigung des Geschosses und der Pulvergase selbst verbraucht, während die rücklaufenden Massen des Geschützes nur einen kleinen Anteil der beim Schuß freigesetzten Energie aufnehmen. Deshalb ist beim simulierten Schuß zur Erzeugung des Rückstoßimpulses nur eine Ladung in der Größe von 5 % der Ladung des echten Schusses erforderlich.

Durch die Simulation des Rückstoßes werden die Kosten je Schuß auf etwa 1/10 der Kosten des echten Schusses gesenkt, so daß auch bei Dauerversuchen der Aufwand in tragbaren Grenzen bleibt. Die meßbaren Einsparungen werden erzielt durch den Wegfall der Geschosse, durch die bereits genannte Reduzierung der für den normalen Schuß erforderlichen Treibladung und durch die Verwendung billigerer Hülsen und Zünder. Darüber hinaus entfällt für das zu prüfende Geschütz der innere Rohrverschleiß. Schließlich werden weitere beträchtliche Einsparungen dadurch erzielt, daß die Versuche dank der Schalldämpfeinrichtung, mit der die Prüfstände ausgerüstet sind, auch außerhalb von Schießplätzen, in bewohnten Gegenden und insbesondere in Waffenwerkstätten durchgeführt werden können.

Rheinmetall hat zwei Ausführungen von dynamischen Geschützprüfständen entwickelt, den ortsfesten Baugruppenprüfstand (Bild 1001) und den fahrbaren Geschützprüfstand (Bild 1002).

10.1.1. Ortsfester Baugruppenprüfstand

Beim ortsfesten Baugruppenprüfstand (Bild 1001), der insbesondere für die Erprobung – auch die Dauererprobung – von Geschützrücklaufeinrichtungen gedacht ist, wird anstelle eines Geschützrohres ein in

Gleitschienen geführtes, mit Teilmassen gefülltes Rohr als Ersatzmasse beaufschlagt. Die zu prüfenden Rohrbremsen und -vorholer sind mit ihren Zylindern an Konsolen des ortsfesten Gestells und mit ihren Kolbenstangen an Konsolen der Ersatzmasse befestigt.

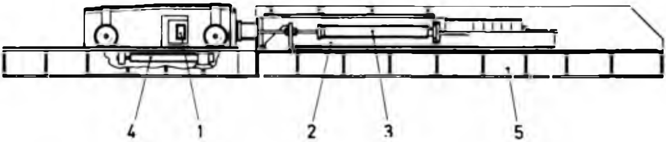
Kernstück des Prüfstandes ist der in einer Zusatzmasse eingebaute Impulsgeber, in dessen Zylinder durch Verbrennung einer Pulverladung von bereits genannter Größenordnung ein Gasdruck erzeugt wird, der über einen Kolben die lose an diesem anliegende Ersatzmasse stoßartig in Bewegung versetzt. Nach einer Wegstrecke, die etwa dem natürlichen Rücklaufweg während der Wirkzeit des Gasdruckes entspricht, hebt sich der Kolben des Impulsgebers von der rücklaufenden Ersatzmasse ab, so daß diese wie beim wirklichen Schuß nach Abklingen der Gaskraft weiter zurückläuft.

Die Testobjekte (Bremse und Vorholer oder zwei Bremsen ohne Vorholer) bremsen die Ersatzmasse ab, wobei die auftretenden Bremskräfte der Größe und dem zeitlichen Verlauf nach denjenigen am Geschütz beim echten Schuß entsprechen.

Zusatzmasse mit Impulsgeber laufen auf Rädern in einer Schienenbettung ebenfalls zurück, jedoch in der dem Rücklauf der Ersatzmasse entgegengesetzten Richtung. Dadurch wird vermieden, daß die mehrere tausend kN betragenden Gaskräfte das Fundament belasten. Auf dem etwa einen Meter betragenden Rücklaufweg wird die Zusatzmasse mit dem Impulsgeber durch eine hydraulische Bremse abgebremst und durch einen Vorholer wieder in die Ausgangslage zurückgefahren.

Die Pulvergase im Impulsgeber strömen nach Beendigung des Arbeitshubes in eine schalldämpfende Expansionskammer innerhalb der Zusatzmasse, wo sie sich auf einen geringen Druck entspannen; anschließend gelangen sie gedrosselt durch kleine Bohrungen ins Freie.

Um die Rücklauf- und Vorholeinrichtungen auch unter extremen Temperaturverhältnissen prüfen zu können, kann der Prüfstand zusätzlich mit Einrichtungen zur Simulation hoher und tiefer Temperaturen ausgestattet werden. Meßeinrichtungen für die zeitlichen Verläufe von Weg und Geschwindigkeit der Ersatzmasse vervollständigen das Gerät.



1 Impulsgeber in der Zusatzmasse; 2 Ersatzmasse; 3 Testbremse (Testvorholer); 4 Bremse und Vorholer der Zusatzmasse; 5 Ortsfestes Gestell

Bild 1001. *Ortsfester dynamischer Baugruppenprüfstand.*

10.1.2. Fahrbarer Geschützprüfstand

Der fahrbare dynamische Geschützprüfstand (Bild 1002), mit dem vollständige Feldgeschütze und Geschütze in Panzern und Selbstfahrlafetten geprüft werden sollen, arbeitet grundsätzlich in der gleichen Weise wie der ortsfeste Prüfstand. Er kann jedoch als mobiles Prüfgerät auch außerhalb von Werkstätten, auf Schießplätzen oder in Bereitstellungsräumen der Truppe eingesetzt werden. Anstelle der Ersatzmasse werden die rücklaufenden Massen des Geschützes durch einen Stoß auf die Mündung beaufschlagt. Das Geschütz wird in seiner freien Erdbewegung (Springen, Verrutschen) nicht behindert.

Der auf zwei Doppelachsgestellen fahrbare Prüfstand wird vor das Geschützrohr gefahren und – bei größeren Leistungen – abgesetzt. Mittels der Hub- und Schwenkbühnen wird der Impulsgeber mit seinem Kolben achsgleich zum Anliegen an die Rohrmündung gebracht. Alle weiteren Funktionen entsprechen denen des ortsfesten dynamischen Baugruppenprüfstandes. An einem angebauten Meßsystem kann die Größe des abgegebenen Impulses nach dem Schuß sofort abgelesen werden.

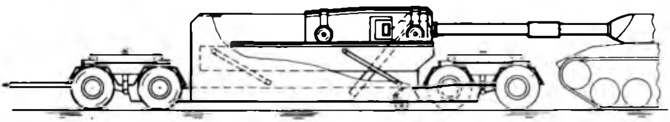


Bild 1002. *Fahrbarer dynamischer Geschützprüfstand.*

10.2. Schlingerstände für Schiffsgeschütze und Feuerleitanlagen

Für die Entwicklung von Geschützen und Feuerleitanlagen für Schiffe werden Bewegungssimulatoren eingesetzt.

Die *Schiffsbewegungen,* nämlich Schlingern, Stampfen und Gieren, werden in sogenannten Schlingerständen simuliert. Die Firma Rheinmetall hat bereits in den 20er Jahren zwei- und dreiachsige Schlingerstände entwickelt und gebaut, die zur Erprobung von Marinegeschützen auf dem Schießplatz in Unterlüß, aber auch zur Schulung der Schiffsartilleristen bei der Marine dienten.

Die Plattform dieser verhältnismäßig kleinen Stände wurde mittels eines Kurbeltriebes bewegt. Die Amplituden (bis ± 14° für das Schlingern und bis ± 8° für das Stampfen) wurden durch Verstellen des Kurbelradius, die Frequenz durch Regeln der Drehzahl des Antriebsmotors bestimmt.

1963/64 hat Rheinmetall für die Erprobungsstelle der Bundesmarine in Eckernförde zwei Schlingerstände zur Erprobung von Marinegeschützen

und Feuerleitanlagen entwickelt, die auf der dafür von den Howaldtswerken gebauten Hubinsel „Barbara" aufgestellt sind (Bild 1003). Die Hubinsel ist mit einer Länge von rd. 50 m und einer Breite von 24 m ein kleiner, in sich abgeschlossener Schießplatz, der schwimmend in Position gebracht und dort auf seine acht Hubbeine abgesetzt wird. Die Verwendung einer mobilen Hubinsel hat den Vorteil, daß von ihr aus in absperrbare Seegebiete geschossen werden kann.

Der große, zweiachsige Prüfstand für 50 t Last gestattet die Darstellung der Gier-Bewegungen um die Hochachse und der Schlinger- bzw. Stampfbewegungen um die Horizontalachse. Der kleine, dreiachsige Stand für 5 t Last gestattet eine gleichzeitige Bewegung von Gieren, Stampfen und Schlingern. Beide Stände können gekuppelt zweiachsig synchron betrieben werden. Die Antriebe der Achsen erfolgen über Gleichstrommotoren, die von einem elektrischen Analogrechner gesteuert werden.

Die Bewegungsvorgänge werden durch eine sinusförmige Grundwelle und eine 1,7fach überlagerte Oberwelle dargestellt, so daß die Auswirkung jeder nur denkbaren Wellenbewegung nachgebildet werden kann.

Die Amplituden betragen ± 25° für das Schlingern und ± 15° für das Stampfen. Um die Hochachse beträgt die Amplitude ± 15° für das Gieren bzw. ± 700° für das Schwenken. Die kürzeste Schwingungsdauer für die Grundwelle beträgt 3,5 Sekunden.



Bild 1003. *Hubinsel „Barbara".*

10.3. Ortsfeste Bewegungsplattform für Kampfpanzertürme

Für die Simulation von *Fahrzeugbewegungen* ist im Gegensatz zu den verhältnismäßig langsamen, sinusartigen Drehbewegungen von Schiffen, die nur kleine Linearbeschleunigungen des Schwerpunktes hervorrufen, zu beachten, daß die Winkelbewegungen eines Fahrzeuges, insbesondere eines Panzers, ebenso wie die Linearbewegungen bei der Fahrt über unebenes Gelände weitaus unregelmäßiger, stoßartiger und hochfrequenter sind. Der zeitliche Verlauf dieser in die Komponenten Rollen, Nicken und Gieren zu zerlegenden Bewegungen hängt außer von der Geländeart wesentlich von der Fahrzeugmasse, der Federung und der Stoßdämpfung, dem Anfahr- und Bremsverhalten, der Lenkung und schließlich vom Rückstoßimpuls beim Schuß ab.

Als Prüfstand für die in modernen Kampfpanzern zum Ausgleich der Winkelbewegungen benutzten Kreiselstabilisierungseinrichtungen hat Rheinmetall[1] eine ortsfeste dreiachsige Bewegungsplattform entwickelt (Bild 1004).



Bild 1004. *Ortsfeste Bewegungsplattform für Kampfpanzertürme.*

---

1) Zulieferer waren die Firmen Honeywell für die steuer- und regelungstechnischen Einrichtungen sowie J.P. Sauer & Sohn, Maschinenbau GmbH, Kiel, für den hydraulischen Teil.

Die Bewegungsplattform simuliert aufgrund elektronisch eingegebener Programme die Winkelbewegungen der Fahrzeugwanne um drei senkrecht zueinander stehende Achsen, deren Schnittpunkt zum aufgesetzten normalen und funktionsfähigen Panzerturm denselben Abstand hat wie das Drehzentrum beim Panzer selbst.

Zwei ineinanderliegende Kardanringe sind auf einem erdfesten Gerüst so gelagert, daß sie die Winkelbewegungen um die Längs- und die Querachse nachbilden. Ein im inneren Kardanring gelagerter Drehring simuliert die Gierbewegungen des Panzers. Dieser Drehring trägt einen Zylindermantel, auf den die Originalwaffenanlage, also z.B. der Panzerturm, aufgesetzt ist. Der Antrieb des Prüfstandes erfolgt hydraulisch.

Es können überlagerte Schwingungen und stoßartige Bewegungen erzeugt werden, wie sie bei der Fahrt über ein mittelschweres Gelände auftreten. Außerdem lassen sich beliebige synthetische, d.h. erdachte Bewegungen innerhalb des Leistungsbereiches simulieren.

Die Anlage wird überwiegend zur Erprobung von Stabilisierungsanlagen eingesetzt; es kann von ihr auch während der Bewegungen geschossen werden.

10.4. Rücklaufmeßstand

Der von Rheinmetall entwickelte Rücklaufmeßstand (Bild 1005) dient zur Bestimmung der Kennwerte von *Mündungsbremsen*, und zwar der Triebziffer λ_M, der Leistungsziffer σ_M und des Wirkungswertes η_M[1]. Zu diesem Zweck werden auf dem Meßstand die Rücklaufimpulse des zu prüfenden Rohres ohne und mit Mündungsbremse ermittelt. Dabei werden die bei einem normalen Geschütz auftretenden störenden Einflüsse von Reibungs-, Brems- und Vorholerkräften dadurch ausgeschaltet, daß das Geschützrohr auf einem Wagen des Rücklaufmeßstandes ungebremst zurücklaufen kann.

Der Rücklaufmeßstand besteht im wesentlichen aus einem fundamentfesten Schienenbett und einem Rücklaufwagen, der auf kugelgelagerten Rädern und schwingungsfrei geführt auf den Schienen rollen kann. In diesen Wagen wird das Testrohr so eingespannt, daß es mit der Mündung (der Mündungsbremse) aus der Schutzblende herausragt.

Beim Schuß läuft der Wagen mit dem Rohr zunächst frei zurück, bis er – nach der Beschleunigung durch den Schuß und nachdem die Rücklaufgeschwindigkeit gemessen ist – mit seinem elastischen Pufferkopf gegen die im fundamentfesten Pufferbock liegende Pufferbremse anläuft. Die Pufferbremse ist mit einem Vorholer kombiniert, der ihre

---

1) Näheres über Mündungsbremsen, die Kennwerte und deren Ermittlung siehe Abschnitte 8.1.3 und 9.7.

Kolbenstange nach beendeter Abbremsung des Rücklaufwagens wieder in die vordere Stellung ausfährt.

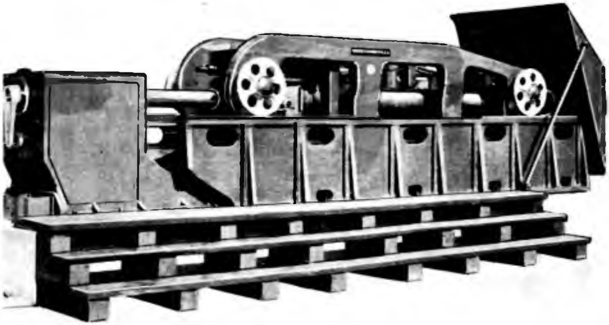


Bild 1005. *Rücklaufmeßstand mit eingelagertem Rohr.*

Die zur Messung der Rücklaufgeschwindigkeit erforderlichen Meßgeräte sind unter dem Rücklaufwagen angebracht.

Auf diesem Rücklaufmeßstand lassen sich auch Knalldruckmessungen durchführen.[1]

10.5. Prüfstände für Waffenanlagen

Um komplette Waffenanlagen einschließlich automatischer Ladeeinrichtungen unabhängig vom Gesamtgerät, z.B. einem Panzer, prüfen, erproben und abnehmen zu können, wurden von Rheinmetall Prüfstände gebaut.

Sie haben alle Anschlußstellen für die Waffenanlagen mit den Originalanschlußmaßen sowie die Aggregate für Drucköl, elektrische Energie bestimmter Spannung, Frequenz und Stromstärke sowie die benötigten Meßgeräte.

Bei stabilisierten Anlagen sind auch die Relativbewegungen z.B. des Kanonenrohres gegenüber dem Turm während der Fahrt darstellbar.

Bild 1006 zeigt den Prüfstand für die Waffenanlage einschließlich der automatischen Ladeeinrichtung eines Kampfpanzers. Mit dem Prüfstand können alle Funktionen der Waffenanlage sowie die fünf elektronischen Programme des Laders im Schuß erprobt werden (siehe auch 8.3.1).

1) Vgl. 14.4.2.



Bild 1006. *Prüfstand für die Waffenanlage und die vollautomatische Ladeeinrichtung eines Kampfpanzers.*

11. Munition

Munition ist der Sammelbegriff für alle Wurfkörper, die mit Hilfe von in irgendeiner Form aufgespeicherter und durch einen Auslösevorgang freigesetzter Energie geworfen, geschleudert oder geschossen werden.

Das Wort ist Anfang des 16. Jahrhunderts aus dem französischen „munition de guerre" für Kriegsbedarf entlehnt und auf Schießbedarf eingeengt worden.

Zur Munition gehören also sowohl die aus Rohrwaffen im weitesten Sinne verschossenen Geschosse als auch die mit mechanischer oder Muskelkraft geschleuderten Handgranaten sowie die von Flugzeugen geworfenen Bomben.

Eine Zwischenstellung nehmen die Raketen ein, bei denen die Antriebsenergie während einer mehr oder weniger langen Phase der Gesamtflugzeit freigesetzt wird. Sie werden daher im Kapitel 12 gesondert behandelt.

Das vorliegende Kapitel befaßt sich demnach ausschließlich mit der von *Rohrwaffen* verschossenen Munition.

11.1. Munitionsaufbau

Grundsätzlich gehören zu einer Munition das Geschoß und die Treibladung. Bei der aus Rohrwaffen verschossenen Munition unterscheidet man dementsprechend im wesentlichen zwischen Patronenmunition und getrennter Munition.

Bei der aus Geschoß und Treibladungshülse bestehenden *Patronenmunition* ist das mit dem Geschoßzapfen in den Hülsenmund eingesteckte Geschoß mit der Hülse durch Preßsitz oder eine Einwürgung zu einer festen Einheit verbunden. Die Hülse enthält die Treibladung in Form von Schütt- oder Stangenpulver und trägt im Boden den Treibladungsanzünder; sie dient beim Schuß als Liderung, indem sie sich fest an die Wandung des Patronenlagers anlegt, so daß keine Verbrennungsgase zum Verschluß hin austreten können (vgl. Abschnitt 11.3).

Die Einheit von Geschoß und Ladung vereinfacht die Munitionszuführung und ermöglicht dadurch eine weitgehende Automatisierung des Ladevorgangs und damit große Feuergeschwindigkeiten. Diese Vorteile müssen allerdings durch konstruktive Besonderheiten wie Auszieh- und Auswerfmechanismen für die leere Hülse erkauft werden.

Patronenmunition wird daher bei allen Handfeuerwaffen und Maschinengewehren, bei automatischen Kanonen und bei Einzelschußwaffen

bis zu einem Kaliber von etwa 120 mm verwendet. Darüber hinaus sind „Patronen" wegen ihres Gewichtes und ihrer Abmessungen nicht mehr oder nur noch schwer zu handhaben. Möglicherweise kann jedoch die Kaliberbegrenzung durch neue Entwicklungen auf dem Gebiete verbrennbarer Hülsen nach oben erweitert werden.

Nachteilig bei Patronenmunition ist, daß während des Schießens das Landungsgewicht nicht variiert und damit die Ballistik nicht beeinflußt werden kann.

Bei *getrennter Munition* werden die einzelnen Munitionskomponenten getrennt geladen, und zwar muß zunächst das Geschoß eingeführt und dabei so fest in das Rohr gedrückt („angesetzt") werden, daß es auch bei großer Rohrerhöhung nicht in den Ladungsraum zurückgleitet. Danach wird das in Beutel aus Kunstseidengewebe eingenähte Treibladungspulver eingebracht und der Treibladungsanzünder, auch Primer genannt, in den Verschluß eingesetzt.

Die Treibladung ist im allgemeinen in einzelne Teilladungen unterteilt. So kennt man bei Haubitzen bis zu acht Teilladungen, während für Kanonen meist bis zu drei üblich sind. Die größte aus Teilladungen zusammengesetzte Ladung ist für die größte Schußweite bestimmt, kleinere Schußweiten erfordern entsprechend weniger Teilladungen.

Im Abschnitt 11.4.4, Artilleriemunition, zeigt Bild 1132 als Beispiel eine Schußeinheit für getrennte Munition. Die erreichbaren Schußweiten und die Schußweitenüberdeckung bei Verwendung von Teilladungen sind in Bild 1131 desselben Abschnittes dargestellt.

11.2. Geschosse

Der Ausdruck Geschoß stellt ganz allgemein einen Sammelbegriff für sämtliche Arten von Wurfkörpern dar. Geschosse mit Zünder und Sprengstoff werden häufig auch als Granaten bezeichnet. Eine strenge sprachliche Trennung hat sich aber auch im rein militärischen Sprachgebrauch nicht eingebürgert.

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die Arten üblicher rohrverschossener Geschosse gegeben und ihre Klassifizierung nach Wirkung, Einsatzart und speziellen Merkmalen (Sondergeschosse) vorgenommen.

Im Abschnitt 11.4, Munitionsarten, werden weitere Darlegungen über Aufbau, Einsatzbedingungen und moderne Entwicklungstendenzen der Geschosse gebracht.

11.2.1. Geschosse für Handfeuerwaffen und Maschinengewehre

Diese Geschosse mit einem Kaliber bis zu 15,24 mm (= 0,6 Zoll) sind je nach ihrem Verwendungszweck Weichkern- oder Stahlkerngeschosse. Sie bestehen aus dem Geschoßmantel aus tiefziehbarem Metall (Messing oder tombakplattiertem Flußstahl) und dem entsprechenden Kern.

Für normale Infanteriemunition (Gefechtsmunition) werden vorwiegend Weichkerngeschosse mit einem Kern aus Hartblei verwandt (Bild 1101 a)

Zur Bekämpfung leicht gepanzerter oder befestigter Ziele verwendet man Geschosse mit einem Stahlkern oder einem Hartkern aus Wolframkarbid, die in eine Bleifüllung eingelegt sind (Bild 1101 b).

Gegen Flugzeuge werden Stahlkerngeschosse mit Leuchtspur oder mit einer Phosphormasse (zur Brandwirkung) eingesetzt (Bild 1101 c und d).

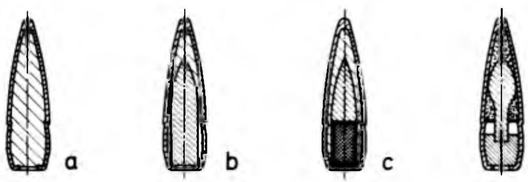


Bild 1101. *Geschosse für Infanteriepatronen;*
a Weichkerngeschoß, b Stahlkerngeschoß, c Stahlkerngeschoß mit Leuchtspur, d Stahlkerngeschoß mit Phosphor.

Geschosse für Handfeuerwaffen und MG besitzen im allgemeinen kein besonderes Führungsband; der etwas überkalibrig gehaltene Geschoßmantel preßt sich beim Eintritt in die Züge in diese ein und nimmt den Drall über der ganzen Führungslänge auf.

Zur Befestigung in der Treibladungshülse sind die Geschosse mit einer Rille versehen, in die der Hülsenrand eingezogen wird.

Zu den Geschossen für Handfeuerwaffen zählt strenggenommen auch die Gewehrgranate, die aber, da sie heute vorwiegend als Hohlladungsgeschoß zur Panzerbekämpfung verwendet wird, als flügelstabilisiertes Hohlladungsgeschoß unter 11.2.3.3.1 behandelt wird.

11.2.2. Sprenggeschosse

Sprenggeschosse für Maschinenkanonen und Artilleriemunition bestehen allgemein aus der Geschoßhülle, der meist eingegossenen oder eingepreßten Sprengstoffüllung und dem Zünder (Bild 1102).

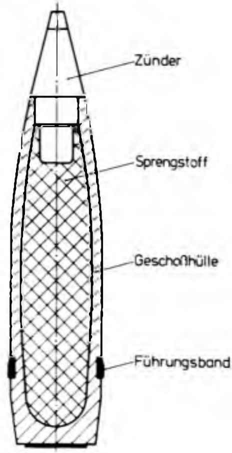


Bild 1102.
Sprenggeschoß (105-mm-Sprenggranate).

Infolge der Detonation der Sprengstoffüllung im Ziel oder in dessen Nähe zerlegt sich die *Geschoßhülle* in einzelne Splitter, die, durch die Detonationsschwaden beschleunigt, erhebliche Energie und damit Zerstörungswirkung besitzen[1].

Hinzu kommt eine von dem detonierenden Sprengstoff ausgehende Druckwelle, die unbefestigte oder leicht befestigte Ziele zerstört oder erheblich beschädigt (Gasschlagwirkung). Der Anteil des Sprengstoffes am Geschoß wird danach bemessen, welche Wirkung im Ziel angestrebt wird. So besitzen Sprenggeschosse ein Massenverhältnis (Sprengstoffgewicht/Geschoßgewicht) von 0,1 bis 0,2, Minengranaten dagegen von 0,25 bis 0,35.

Die Sprenggeschosse haben eine Hülle mit relativ dicker Wandstärke, die eine möglichst große Anzahl auch in der Tiefe wirksamer Splitter ergeben soll. Um zu erreichen, daß vorwiegend Splitter einer günstigen Größe entstehen, kann man die Geschoßhülle durch Einkerben oder neuerdings durch Elektronenstrahlen entsprechend vorbehandeln. Man spricht dann von Konstruktions- oder auch kurz von K-Splittern[2].

---

1) Vgl. Explosivstoffe, 1.4.6.

2) Vgl. Explosivstoffe, 1.4.6.2.

Die stählerne Hülle wird nach verschiedenen Fertigungsverfahren hergestellt; sie kann kalt gezogen, warm gepreßt oder gegossen werden. Bei kleinen Kalibern kann auch die spanabhebende Fertigung aus Vollmaterial wirtschaftlich sein. Die Streckgrenze der Hüllenwerkstoffe liegt zwischen 500 und 900 N/mm^2.

Sprenggeschosse besitzen im allgemeinen gute Flugeigenschaften und sind auch auf große Reichweiten mit hoher Treffgenauigkeit zu verschießen.

Für die üblichen, drallstabilisierten und kalibergleichen Sprenggeschosse gelten etwa die folgenden Konstruktionsrichtlinien (Bild 1103):

Geschoßgewicht m_G (kg)	$(13 \cdots 15)d^3$ (d = Kaliber in dm)
Gesamtlänge L (mm)	$(4 \cdots 6)d$
Ogivallänge L_0 (mm)	$(2 \cdots 3)d$
Führungslänge L_f (mm)	$(1{,}5 \cdots 2)d$
Hecklänge L_h (mm)	$\approx 0{,}5d$
Ogivalradius R_0 (mm)	$(10 \cdots 20)d$
Heckwinkel φ	$(5 \cdots 9)^\circ$
Ogivaleinlaufwinkel α	$(3 \cdots 5)^\circ$

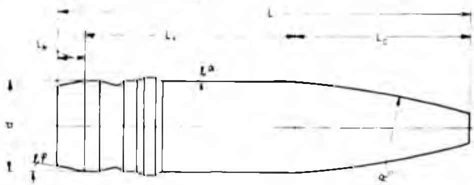


Bild 1103. *Sprenggeschoß, Konstruktionsmaße.*

Die Drallübertragung auf die Geschosse erfolgt durch ein oder mehrere *Führungsbänder*, über die ausführlicher unter 11.5.1, Der Drall und die Führungsbänder, berichtet wird.

Der *Sprengstoff* wird meist von der Spitze her eingebracht. Anstelle des früher üblichen TNT (Trinitrotoluol) wird heute ein energiereicheres Gemisch aus TNT und Hexogen, meist im Verhältnis 40/60, teilweise auch 30/70, benutzt.

Eine unmittelbare Berührung von Sprengstoff und Stahl kann zu Korrosionserscheinungen des Stahls führen. Um sie zu vermeiden, wird die Geschoßhülle innen mit einem chemisch neutralen Lack versehen. Dieser soll gleichzeitig eine gute Haftung zwischen Hülle und Sprengstoff vermitteln, damit der Drall voll auf den Sprengstoff übertragen wird und dieser beim Abschuß infolge der Drehbeschleunigung in der Geschoßhülle nicht durchrutscht.

Zur Vermeidung von Rohrkrepierern, die zur Zerstörung der Waffe und zu einer tödlichen Gefährdung der Geschützbedienung führen können, muß die Abschußsicherheit der Sprenggeschosse auch geschoßseitig gewährleistet sein. Um diese zu erhöhen, wird jede Geschoßhülle einschließlich des Geschoßbodens durch verschiedene Prüfverfahren (Magnetpulver- oder Ultraschallprüfung, Abdrücken u.a.) auf Rißbildungen und Gefügeungleichmäßigkeiten untersucht.

Der Gefahr des Durchschlagens von Verbrennungsgasen durch den Geschoßboden wird besondere Aufmerksamkeit gewidmet: Bei geschlossenen Böden (vgl. Bild 1102) großkalibriger Geschosse wird außen auf den Boden meist noch ein Blech aufgeschweißt oder aufgewalzt; bei eingeschraubten Böden wird das Gewinde durch einen mit Blei verstemmten Kupferring zusätzlich abgedichtet oder durch eine mit Blei verstemmte Kupferscheibe ganz überdeckt.

Ebenfalls zur Erhöhung der Abschußsicherheit dient die in das Mundloch eingesetzte „Mundlochbüchse" (s. Bild 1132); sie soll verhindern, daß Sprengstoffteile, die sich beim Abschrauben der Füllvorrichtung oder beim Transport gelockert haben, beim Einschrauben des Zünders eingeklemmt werden.

Auch die Sprengstoffüllungen werden Prüfungen mittels Röntgenstrahlen auf Lunker und Homogenität unterzogen.
Der *Zünder* wird bei großkalibriger Artilleriemunition erst in der Feuerstellung auf das Geschoß geschraubt. Bei Munition für klein- und mittelkalibrige Automatenwaffen sowie für Panzerbordkanonen wird der Zünder bei der Munitionsfertigung möglichst fest und mittels einer Sicherung (z.B. Körnerschlag) mit dem Geschoß verbunden. Art und Funktion der Zünder, z.B. Aufschlag-, Zeit- oder Abstandzünder, sind entscheidend für die Wirkung der Sprenggranate im Ziel[1]).
Das *Sprengbrandgeschoß* entspricht im konstruktiven Aufbau und in der Wirkung dem Sprenggeschoß. Dem Sprengstoff ist ein Anteil (etwa 30 bis 40 %) Aluminiumpulver beigemischt, durch das eine zusätzliche Entzündungs- und Brandwirkung im Ziel erreicht werden soll. Die Wirksamkeit der Splitter wird dabei im gewissen Umfang reduziert.

Das *Minengeschoß* ist speziell auf eine große Gasschlagwirkung ausgelegt. Es hat eine dünnwandige Geschoßhülle mit möglichst großem Sprengstoffinhalt; damit verringert sich allerdings seine Durchschlagkraft und die Splitterwirkung.

Minengeschosse werden vorzugsweise gegen Flugzeuge eingesetzt, wo der Gasschlag die Zerstörung der Zelle bewirken soll. Wegen des geringeren Geschoßgewichtes ist die Minengranate dem Sprenggeschoß in der Reichweite und der Flugzeit auf größere Schußentfernung und damit auch in der Treffgenauigkeit unterlegen.

---

1) Vgl. Kap. 13, Zünder.

Zu den *Spreng*geschossen sind auch die *Granatwerfergeschosse* zu zählen, die – flügelstabilisiert – aus Granatwerfern oder Mörsern verschossen werden. Da das einzelne Geschoß als vollständige Schußeinheit zugleich Gefechtskopf und Treibladung umfaßt, sind Granatwerfergeschosse nicht hier unter „Geschosse", sondern im Abschnitt „Munitionsarten" unter 11.4.5, Granatwerfermunition (Mörsermunition), ausführlich behandelt.

11.2.3. **Panzerbrechende Geschosse**

Panzerbrechende Geschosse sollen gepanzerte Ziele durchdringen und hinter der Panzerung wirken.

Man unterscheidet im wesentlichen Wuchtgeschosse, Hohlladungsgeschosse, Quetschkopfgeschosse und Geschosse für konische Rohre.

11.2.3.1. **Kalibergleiche Wuchtgeschosse**[1]

Reine Wuchtgeschosse, also Geschosse, die keinen Sprengstoff enthalten, wirken im Ziel nur durch ihre *k*inetische *E*nergie, weswegen sie auch „KE-Geschosse" genannt werden. Nach dem Durchschlag der Panzerung bilden sie auf der Ausschußseite einen Kegel aus Fragmenten des Geschoß- und Zielmaterials, welche aufgrund ihrer großen Restenergie und hohen Temperatur Zerstörungen im Kampfraum bewirken sollen.

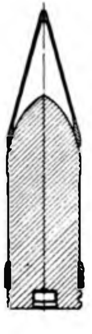


Bild 1104. Panzervollgeschoß.

1) Über die Durchschlagleistung von Panzergeschossen s. 11.4.3.1.

Ein kalibergleiches Wuchtgeschoß ist das *Panzervollgeschoß* (Bild 1104). Es besteht aus einer hochwertigen, oberflächengehärteten, im Kern jedoch zähen Stahllegierung. Der für flache Auftreffwinkel meist an sich stumpfe Wirkteilkörper erhält zur Verringerung des Luftwiderstandes eine ballistische Haube aufgesetzt. Aufgrund des großen Gewichtes haben diese Geschosse gute Flugeigenschaften und geringe Geschwindigkeitsverluste, jedoch auch geringe Anfangsgeschwindigkeiten (700 bis 900 m/s).

Das in Bild 1105 dargestellte *Hartkerngeschoß* bildet bereits eine Zwischenstufe zu den modernen unterkalibrigen Panzergeschossen (s. 11.2.3.2, Treibkäfiggeschosse). Der Wirkkörper, ein Hartmetallkern aus Wolframkarbid, besitzt eine sehr hohe Dichte und Härte. Er hat einen Durchmesser von etwa 30 bis 40 % des Rohrkalibers und ist in einer Hülle aus Leichtmetall eingebettet.

Das Geschoß ist verhältnismäßig leicht und erreicht deswegen hohe Mündungsgeschwindigkeiten. Das geringe Verhältnis von Geschoßmasse zu Geschoßquerschnitt wirkt sich außenballistisch jedoch ungünstig aus, der Geschwindigkeitsverlust und damit das Panzerdurchschlagvermögen nehmen daher bei großen Schußentfernungen rapide ab.

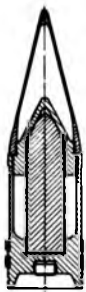


Bild 1105. *Hartkerngeschoß*.

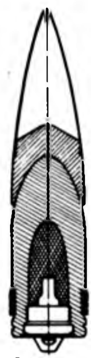


Bild 1106. *Panzersprenggranate*.

Die *Panzersprenggranate* (Bild 1106), ein im Zweiten Weltkrieg weit verbreitetes Geschoß, kann ebenfalls zu den Wuchtgeschossen gerechnet werden, da das eigentliche Durchschlagen der Panzerung durch die kinetische Energie des Geschosses bewirkt wird. Es enthält nur eine relativ kleine Sprengladung, die über einen Bodenzünder initiiert wird und erst nach dem Durchschlagen der Panzerung detonieren soll. Der Stahlkörper ist an der Spitze auf 60 bis 65 HRC (Härte nach Rockwell) gehärtet. Meist ist vor dem Stahlkörper noch eine Kappe aus Stahl aufgesetzt, um die Durchschlagleistung bei flachen Auftreffwinkeln zu verbessern. Eine ballistische Haube sorgt für eine außenballistisch

günstige Form. Trotz der guten Wirkung im Ziel wird auch dieses Geschoß wegen des zu hohen Gewichtes und deswegen zu geringer Mündungsgeschwindigkeit aus modernen Bordkanonen nicht mehr verschossen.

11.2.3.2. Unterkalibrige Wuchtgeschosse (Treibkäfiggeschosse)

Unterkalibrige Geschosse haben, wie der Name sagt, einen Geschoßdurchmesser, der kleiner als der des Rohres ist, aus dem sie verschossen werden (Bild 1107). Sie bedürfen also einer Führung von Rohrkalibergröße, die gleichzeitig zur Übertragung der beschleunigenden Gaskräfte auf das Geschoß dient. Unterkalibrig ist also in Wirklichkeit nur das von der Führung während des Abschusses getragene Geschoß. Nach dem Verlassen des Rohres fällt die Führung vom Geschoß ab, das dann allein weiterfliegt.

Das Prinzip der Leistungssteigerung, die mit unterkalibrigen Geschossen erreicht wird, besteht darin, daß — auf das *Rohr*kaliber bezogen — das relativ leichte Geschoß bei geringer Querschnittsbelastung (Verhältnis von Geschoßmasse zu seinem Querschnitt) eine hohe Anfangsgeschwindigkeit erhält und daß es nach dem Verlassen des Rohres — also auf den jetzt kleineren *Flug*durchmesser bezogen — relativ schwer ist, d.h. eine große Querschnittsbelastung erfährt, die einen geringen Geschwindigkeitsabfall bedeutet.

Unterkalibrige Panzergeschosse sind moderne Hochleistungsgeschosse, die die Forderung nach hohen Anfangsgeschwindigkeiten, hohen Durchschlagsleistungen sowie rasanten Flugbahnen und großen Reichweiten erfüllen.

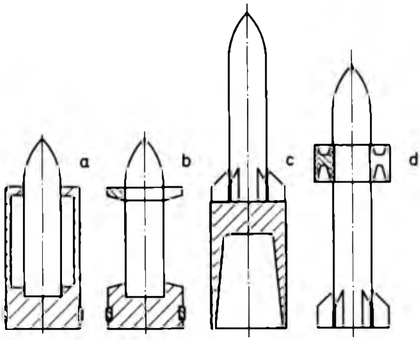


Bild 1107. *Unterkalibrige Panzergeschosse (TK-Geschosse);*
a mit Treibkäfig, b mit Treibscheibe und Stützring, c mit Treibkolben, d mit Treibring.

Nachteilig sind die nach dem Verlassen des Rohres abfliegenden Teile der Führungselemente, da diese die eigene Truppe beim Überschießen gefährden.

Die Führungen werden je nach ihrer Konstruktion als Treibkäfig, Treibspiegel, Treibkolben, Treibscheiben, Treibring o.ä. bezeichnet. Eingeführt hat sich die Bezeichnung *Treibkäfiggeschoß* (TK-Geschoß), die den früher üblichen Namen Treib*spiegel*geschoß abgelöst hat.

Bild 1107 zeigt schematisch einige Ausführungen von Treib- und Führungselementen, und zwar in Fig. a einen Treibkäfig, in Fig. b ein Geschoß mit Treibscheibe (Treibspiegel) und einem Stütz- oder Führungsring, in Fig. c einen Treibkolben und in Fig. d einen Treibring. Die Anordnungen a und b sind drallstabilisiert, die Anordnungen c und d verwenden flügelstabilisierte Geschosse.

Die Führungselemente sollen möglichst leicht sein, um einmal dem Beschleunigungsvorgang im Rohr keine zu hohe Masse entgegenzusetzen und zum andern den Ablösevorgang nicht durch zu große Trägheit zu hemmen.

Bild 1108 zeigt den konstruktiven Aufbau eines modernen drallstabilisierten Treibkäfiggeschosses. Der Treibkäfigboden besteht aus einer hochfesten Aluminiumlegierung, der Treibkäfig selbst aus einer Magnesiumlegierung; bei kleinen Kalibern werden für die Treibkäfigteile zuweilen auch Kunststoffe verwendet. Das Führungsband wie auch das vordere Gleitband bestehen oft aus Kunststoff. Beim Abschuß reißt der Treibkäfig infolge der Trägheitskräfte der Stützsegmente an der Sollbruchstelle durch; die Stützsegmente setzen sich um das Maß des Spaltes a zurück und wandern infolge der Konizität der Geschoßspitze radial

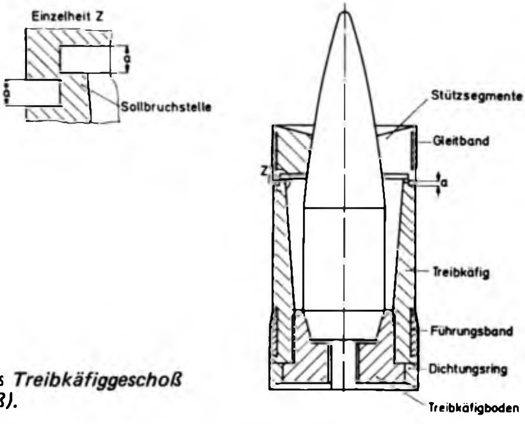


Bild 1108.
Drallstabilisiertes Treibkäfiggeschoß (TK-KE-Geschoß).

nach außen, wodurch sie eine gute Zentrierung des Geschosses bewirken. Nach dem Verlassen des Rohres geben die (meist dreiteilig ausgebildeten) Stützelemente das Geschoß frei, das sich dann infolge der Luftkräfte aus dem restlichen Käfigtopf löst.

Bild 1109 stellt einen von Rheinmetall entwickelten Treibring für ein flügelstabilisiertes KE-Geschoß (APDSFS)[1], ein „Pfeilgeschoß" dar. Der Treibring ist der Länge nach dreigeteilt, sein Ablösen nach dem Verlassen des Rohres wird durch die Luftkräfte bewirkt[2].

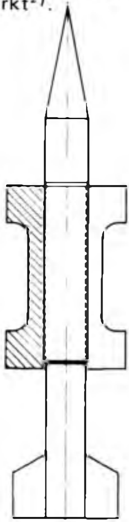


Bild 1109. *Flügelstabilisiertes Treibkäfiggeschoß.*

11.2.3.3. Hohlladungsgeschosse

Hohlladungsgeschosse (HL-Geschosse) erzielen ihre panzerbrechende Wirkung mit Hilfe des sog. Hohlladungseffektes[3]. Die durch die Schwaden des detonierenden Sprengstoffes zu einem Strahl verformte Metalleinlage vermag infolge ihrer außerordentlich hohen Strahlgeschwindigkeit dicke Panzerungen zu durchdringen.

---

1) APDSFS = armor piercing discarding sabot fin stabilized, panzerbrechendes Treibkäfiggeschoß, flügelstabilisiert.

2) Die ebenfalls zu den unterkalibrigen Geschossen zu zählenden Pfeilgeschosse sind unter 11.2.4 behandelt.

3) Eine ausführliche Behandlung des Themas Hohlladungen ist im Kap. Explosivstoffe unter 1.4.6.3 gegeben.

Eine meist relativ dünnwandige Geschoßhülle aus Stahl enthält die gegossene oder eingepreßte Sprengladung mit der kegeligen Einlage aus leicht verformbarem Material. Die Einleitung der Detonation erfolgt von hinten über einen heute fast ausschließlich verwendeten elektrischen Bodenzünder. Die Geschoßspitze aus Leichtmetall ist oft so ausgebildet, daß sie beim Aufprall infolge ihrer Deformation eine Zündspannung kurzschließt oder durch ein piezoelektrisches Element eine Spannung erzeugt[1].

Ein charakteristisches Merkmal der Hohlladungsgeschosse ist die lange, hohle Geschoßspitze. Sie wird benötigt, um zu gewährleisten, daß sich der Hohlladungsstrahl ausbildet, bevor die eigentliche Ladung auf der Panzerung auftreffen und zerschellen kann. Moderne Hohlladungsgeschosse mit spitzkegeliger Kupfereinlage (Kegelwinkel 60 bis 70°) durchdringen Panzerungen, deren Dicke mehr als das Fünffache des Einlagedurchmessers beträgt. Mit sehr genau gefertigten Hohlladungen läßt sich eine weitere Steigerung der Durchschlagsleistung erreichen.

Die Strahlgeschwindigkeit ist mindestens um den Faktor 10 größer als die Geschoßgeschwindigkeit. Das macht Hohlladungsgeschosse im Gegensatz zu Wuchtgeschossen in ihrer Wirkung nahezu unabhängig von der Anfangsgeschwindigkeit und der Schußweite. Beide Größen beeinflussen lediglich die Flugzeit und damit die Treffgenauigkeit.

Bei *rotierenden Hohlladungen* (drallstabilisierter HL-Geschosse) nimmt die Durchschlagsleistung mit wachsender Drehzahl sehr schnell ab. Die bei der Geschoßrotation entstehenden Tangentialgeschwindigkeiten überlagern sich mit den bei der Einlageverformung auftretenden Radialgeschwindigkeiten; dadurch wird die Ausbildung des Hohlladungsstrahles stark gestört. So verringert sich die Durchschlagsleistung bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 20 m/s auf 50 %, bei 60 m/s sogar auf 20 %. Bei Drehzahlen, wie sie für drallstabilisierte Geschosse notwendig sind, ist die Eindringtiefe der Spitzkegel-Hohlladung nahezu bedeutungslos. Aus diesem Grunde ist die Mehrzahl der Hohlladungsgeschosse nicht drall-, sondern *flügel*stabilisiert.

Es gibt jedoch auch drallstabilisierte HL-Geschosse, bei denen durch besondere konstruktive und fertigungstechnische Maßnahmen erreicht wird, daß der durch Drall verursachte Verlust an Durchschlagsleistung ganz oder zumindest teilweise vermieden wird (s. 11.2.3.3.2, Drallstabilisierte Hohlladungsgeschosse).

11.2.3.3.1. Flügelstabilisierte Hohlladungsgeschosse

Hierzu sei zunächst einiges über die Leitwerk- oder Flügelstabilisierung von Geschossen gesagt.

---

1) Vgl. Kap. 13, Zünder, insb. Bilder 1312 und 1304.

Flügelstabilisierte Geschosse besitzen am Heck Leitwerke, die aufgrund der aerodynamischen Umströmung Luftkräfte und damit Gegenmomente erzeugen, sobald das Geschoß durch Störeinflüsse aus seiner normalen Fluglage ausgelenkt wird. Um die Bildung solcher stabilisierenden Luftkraftmomente zu erreichen, ist es erforderlich, daß der Angriffspunkt aller aerodynamischen Luftkräfte hinter dem Schwerpunkt liegt.

Die Leitwerkstabilisierung bei Geschossen empfiehlt sich grundsätzlich, wenn die Geschoßlänge mehr als das 6fache des Flugkalibers beträgt. Die Geschosse sind dann durch Drall nur noch schlecht oder bei wesentlich größeren Längen gar nicht mehr zu stabilisieren, da die notwendigen Drehzahlen zu einer zu starken Beanspruchung der Geschosse und der Züge im Rohr führen. Leitwerke waren noch bis Ende des Zweiten Weltkrieges fast nur Raketen oder Wurfgranaten geringer Abschußbeanspruchung vorbehalten. Eine Ausnahme bildeten die Pfeilgeschosse[1)].

Bessere Fertigungstechnologien und Materialeigenschaften, tiefere Kenntnisse des aerodynamischen Verhaltens und nicht zuletzt wachsende Anforderungen an die ballistische Leistung und Wirksamkeit moderner Panzergeschosse läßt Leitwerksanordnungen seit Jahren zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Im folgenden werden einige Ausführungen von Hohlladungsgeschossen mit Leitwerksstabilisierung beschrieben.

Ein am Heck eines Geschosses angebrachtes Leitwerk entfaltet seine aerodynamische Wirkung, wenn es weitgehend in der ungestörten Luftströmung liegt. Es sollte daher möglichst über den Geschoßdurchmesser herausragen.

Das ist der Fall bei den bereits unter 11.2.3.2 behandelten unterkalibrigen Geschossen c und d des Bildes 1107 sowie bei Geschossen mit Klappleitwerken, deren Flügel nach Verlassen des Rohres auf Überkaliberweite aufklappen.

Bild 1110 a zeigt ein solches Geschoß mit Klappleitwerk, dessen Flügel sich durch vorgespannte Federn oder durch den Druck einer Gaskammer aufspreizen. Das Aufklappen der Flügel muß schnell und absolut gleichmäßig erfolgen, da sonst mit großen Abgangsfehlern zu rechnen ist. Das Leitwerk besitzt eine gute aerodynamische Wirksamkeit, jedoch reagiert es, da es beim Abschuß im Bereich der Treibladungsgase liegt, empfindlich auf hohe Abschußbelastungen, weswegen es für Panzerkanonen hoher Leistung nicht verwendbar ist. Ferner ist die Verwendung von Mündungsbremsen bei Geschossen mit Klappleitwerk problematisch.

---

1) Siehe 11.2.4.

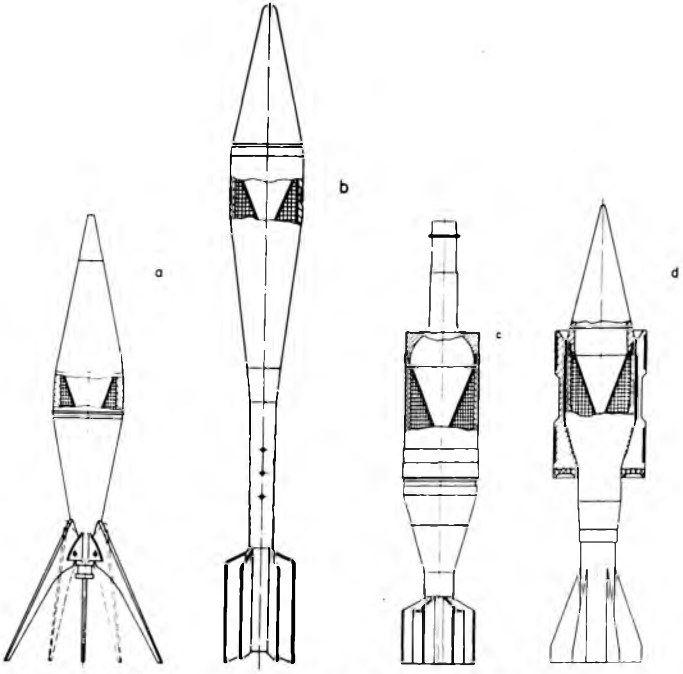


Bild 1110. *Leitwerksanordnungen bei flügelstabilisierten HL-Geschossen;*
a Klappleitwerk, b kalibergleiches Leitwerk, c kalibergleiches stranggepreßtes Alu-Leitwerk, d unterkalibriges Leitwerk mit Treibkäfig.

Mit besonderen Maßnahmen läßt sich eine ausreichende Geschoßstabilisierung auch mit einer kalibergleichen Leitwerksanordnung erreichen. Dazu müssen die Flügel jedoch sehr weit hinter dem Wirkteil liegen und mit ihm über einen dünnen Schaft verbunden sein (Bild 1110 b). Da hierbei der Geschoßschwerpunkt sehr weit nach vorn rückt, bewirkt diese Leitwerksanordnung bei zwar geringer aerodynamischer Wirksamkeit über den langen Hebelarm eine noch ausreichende Stabilisierung. Diese Konstruktion verlangt sehr lange Geschosse und vermindert bei Patronenmunition den Ladungsraum. Außerdem ist wegen des Leitwerks nur ein relativ geringer Höchstgasdruck (2000 bis 2500 bar) möglich.

Der hohle Leitwerksschaft enthält die Treibladungsanfeuerung, die durch die Bohrungen hindurch wirkt. Nachteilig ist die etwas umständliche Fertigung wegen der in der Treibladungshülse anzuordnenden Leitschienen, die erforderlich sind, um das kalibergleiche Leitwerk unbeschädigt aus der flaschenförmigen Treibladungshülse heraus in den gezogenen Teil des Rohres einzuführen.

Auch Geschosse mit kürzerem kalibergleichem Leitwerk lassen sich flügelstabilisieren, wenn z.B. am Geschoßkopf Rillen oder Stirnflächen vorgesehen werden, durch die eine Zirkularströmung hervorgerufen wird, die einen Druckausgleich verursacht; das destabilisierende Luftkraftmoment am Geschoßkopf wird dadurch herabgesetzt.

Bild 1110 c zeigt ein solches, für Panzerbordkanonen bestimmtes HL-Geschoß mit kalibergleichem Leitwerk. Es ist aus den vorgenannten Gründen mit einer Stirnfläche an der Geschoßhaube versehen, die in einen „Schnorchel" ausläuft, der unter Wahrung des für die Hohlladungsentwicklung notwendigen Abstandes die Zündung einleitet. Das kurze robuste Leitwerk aus stranggepreßtem Aluminium erlaubt hohe Gasdrücke (bis über 5000 bar), die große Mündungsgeschwindigkeiten ermöglichen. Infolge der widerstandsmäßig ungünstigen Geschoßform ist der Geschwindigkeitsabfall jedoch sehr hoch.

Bild 1110 d stellt ein von Rheinmetall entworfenes unterkalibriges HL-Geschoß mit Treibkäfig dar. Das kurze Leitwerk hat gegenüber dem Rohr geringes Unterkaliber, gegenüber dem Gefechtskopf jedoch Überkaliber. Es erlaubt infolge seiner kurzen robusten Ausführung sehr hohe Gasdrücke und ergibt infolgedessen hohe Mündungsgeschwindigkeiten; darüber hinaus hat das Geschoß eine günstige außenballistische Form; beides zusammen führt zu kurzen Flugzeiten und damit zu erhöhten Treffwahrscheinlichkeiten. Als Nachteil — von der möglichen Eigengefährdung durch abfliegende Treibkäfigteile abgesehen — muß die wegen des gegenüber kalibergleichen Geschossen kleineren Sprengstoffinhalts und Einlagedurchmessers geringere Durchschlagsleistung in Kauf genommen werden.

Die Geschosse nach Bild 1110 b und c können auch aus Panzerkanonen mit normalem Drall und normalem Zugprofil verschossen werden. Sie haben deshalb anstelle eines festen Führungsbandes ein durchrutschendes Dichtungsband aus Kunststoff.

Zu den flügelstabilisierten HL-Geschossen zählt auch die *Gewehrgranate,* die als überkalibriges Aufsteckgeschoß vom Infanteriegewehr verschossen wird (Bild 1111). Sie läßt ziemlich jede Form eines Leitwerkes zu. Das gegenüber einem Infanteriegeschoß erheblich größere Geschoßgewicht läßt nur eine geringe Anfangsgeschwindigkeit zu, so daß nur Reichweiten bis zu 250 m erzielt werden.

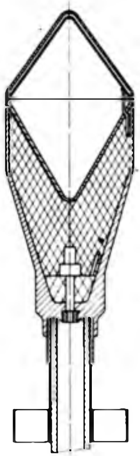


Bild 1111. *Auf Infanteriegewehr aufgesteckte Gewehrgranate.*

11.2.3.3.2. **Drallstabilisierte Hohlladungsgeschosse**

Die Notwendigkeit, Geschosse mit spitzkegeligem Hohlladungswirkteil flügelstabilisiert zu verschießen, führt in jedem Fall zu einem großen Aufwand in der Geschoßkonstruktion und bei der Auslegung der Patrone. Es werden daher Anstrengungen gemacht, das Hohlladungsprinzip auch bei drallstabilisierten Geschossen zu verwenden. An diesen Entwicklungen wird noch gearbeitet.

Man begann mit einem drallverschossenen Hohlladungsgeschoß mit Spitzkegeleinlage, bei dem die eigentliche Ladung gegenüber der Geschoßhülle so abgestützt ist, daß der Drall gar nicht oder nur teilweise auf die Ladung übertragen wird.

Das „G-Geschoß" (nach dem Erfinder GESSNER) besteht aus zwei Hüllen, die gegeneinander über Kugellager drehbar gelagert sind. Die äußere Geschoßhülle nimmt den vollen Drall auf und bewirkt die Stabilisierung des Geschosses. Die innere Hülle enthält die Hohlladung mit Einlage und ist mit der Geschoßspitze verbunden, die aufgrund ihres Reibungswiderstandes oder mittels kleiner Leitschaufeln einen leichten Anfangsdrall, der trotz der drehbaren Lagerung auftritt, kompensiert. Dieses Geschoß besitzt praktisch die Wirkung rotationsfreier Hohlladungen, ist jedoch fertigungstechnisch sehr aufwendig und auf kleine Kaliber, deren Abschußbeschleunigungen bis zu 50000 g reichen, kaum anwendbar.

Mit Hilfe sog. Flachkegel-Hohlladungen ist aber auch die Konstruktion drallstabilisierter Hohlladungsgeschosse mit fester (nicht drehbarer) Einlage möglich. Ihre Durchschlagsleistungen erreichen zwar nicht die Werte der drallfreien Spitzkegelversionen, aber von einer mittleren, kaliberabhängigen Kampfentfernung an sind sie durchaus mit den Durchschlagsleistungen unterkalibriger Wuchtgeschosse vergleichbar.

Diese Hohlladungsausführung[1] besteht aus einer Einlage mit einem Kegel von 130 bis 140° Öffnungswinkel und einer von innen nach außen variierten Wandstärke. Diese Einlage aus leicht verformbarem Material wird durch die Detonation zu einem Projektil verformt, das mit einer Geschwindigkeit von 4500 bis 1700 m/s (von Projektilspitze bis -ende gemessen) erhebliches Durchschlagsvermögen besitzt.

Mit dieser Ladungsanordnung lassen sich Panzerdurchschlagsleistungen von maximal 3,5 Einlagedurchmesser erreichen; der Drallverlust ist dabei vergleichsweise gering.

Den Aufbau eines drallstabilisierten Flachkegel-Hohlladungsgeschosses zeigt Bild 1112. Er entspricht bis auf die Auslegung der Einlage im wesentlichen der Spitzkegelversion. Oft wird vor der Einlage eine metallische Düse angeordnet, die eine Leistungsverbesserung bei Rotation bewirkt.

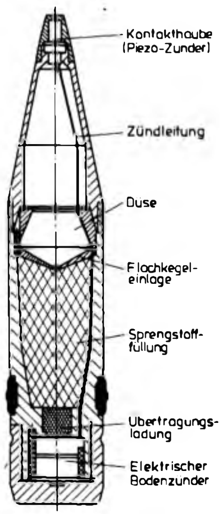


Bild 1112.
Drallstabilisiertes Flachkegel-Hohlladungsgeschoß.

---

1) Vgl. Explosivstoffe, 1.4.6.3, Bild 124.

Bemerkenswert ist die verhältnismäßig große Wandstärke der Geschoßhülle, die primär vorgesehen wird, um der Einlage eine gute seitliche Verdämmung zu geben; sie führt darüber hinaus jedoch auch zu wirkungsvollen Splittern, so daß ein Flachkegel-Hohlladungsgeschoß neben der panzerbrechenden auch eine gute Splitterwirkung besitzt, die die Verwendung als „Mehrzweckgeschoß" ermöglicht.

11.2.3.4. Quetschkopfgeschosse

Die Wirkung eines Quetschkopfgeschosses beruht darauf, daß bei der Detonation der Sprengstoffüllung *auf* der Panzerung eine intensive Stoßwelle in die letztere eingeleitet wird, bei deren Reflexion an der inneren Oberfläche sich Teile des Panzermaterials (Fladen) ablösen und in den Kampfraum fliegen.

Das Geschoß (Bild 1113) besteht aus einer dünnwandigen Geschoßhülle mit stark abgerundeter Spitze und einer Ladung aus plastisch verformbarem hochbrisantem Sprengstoff, z.B. Nitropenta mit großem Wachsanteil. Die Zündung erfolgt verzögert vom Bodenzünder aus.

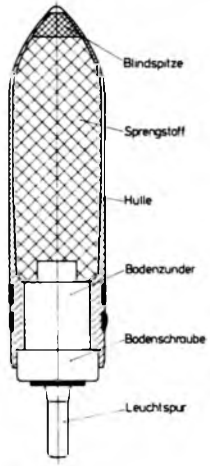


Bild 1113. *Quetschkopfgeschoß (HESH-T).*

Beim Auftreffen auf ein gepanzertes Ziel bietet die Hülle nur geringen Verformungswiderstand; der plastische Sprengstoff wird durch die Auftreffwucht fest an die Panzerung gedrückt und legt sich bis zur verzögerten Zündung fladenartig an. Die auf der Innenseite der Panzerung

abplatzenden Teile haben eine beträchtliche Energie und geschoßartige Wirkung. Darüber hinaus führen die von der Detonation hervorgerufenen Erschütterungen im getroffenen Panzer häufig noch zum Losreißen von Halterungen und zur Beschädigung stoßempfindlicher Teile.

Nachteilig an dieser Geschoßart ist die relativ geringe Mündungsgeschwindigkeit, da sie aufgrund ihrer dünnen Hüllenkonstruktion beim Abschuß nicht zu stark beansprucht werden darf. Die üblichen Anfangsgeschwindigkeiten liegen um 700 bis 800 m/s.

Die hohe, sehr brisante Sprengstoffmenge macht das Quetschkopfgeschoß auch als Sprenggeschoß mit großer Gasschlagwirkung verwendbar.

11.2.3.5. Flanschgeschosse für konische Rohre

Flanschgeschosse für konische Geschützrohre (Bild 1114) besitzen flanschförmige Elemente – daher ihre Bezeichnung –, die die Geschoßführung in einem konischen Rohr gewährleisten.

Konische Geschützrohre kamen erstmals im Zweiten Weltkrieg zum Einsatz, obwohl sie bereits 1905/1907 von Karl PUFF (Patente aus dem Jahre 1903) und 1929 erneut von H. GERLICH vorgeschlagen wurden[1].

Das konische Rohr dient ähnlich wie das Treibspiegelprinzip zur Darstellung hoher Geschoßanfangsgeschwindigkeiten. Beim konischen oder, wie es im damaligen Schrifttum auch genannt wurde, dem kegelig gebohrten Rohr nimmt der Rohrdurchmesser vom Patronenlager zur Mündung hin ab.

Das Geschoß hat stulpenartige Führungsflansche am Heck und am vorderen Geschoßmantel, die die Geschoßführung beim anfänglich größeren Rohrdurchmesser und die Abdichtung gegenüber den Pulvergasen übernehmen. Zuweilen ist der vordere Flansch durch fingerhutförmige Noppen ersetzt (Bild 1114 b). Flansche und Noppen verformen sich beim Durchgang durch das Rohr und passen sich dem abnehmenden Kaliber bis auf den Enddurchmesser des Rohres an, bis sie schließlich ganz am Geschoßkörper anliegen.

Das eigentliche, – bezogen auf das Ausgangskaliber – relativ leichte, praktisch unterkalibrige Geschoß erfährt im Bereich des hohen Gasdruckes infolge seiner geringen Masse im Verhältnis zum Querschnitt eine große Beschleunigung. Die kontinuierliche Querschnittsverringe-

---

1) Vgl. NEUFELDT, H.: Hochleistungswaffen mit konischen Rohren für die Deutsche Wehrmacht im Zweiten Weltkrieg. Wehrt. Mh. 64 (1967) Nr. 4, S. 144, Nr. 5/6, S. 226.

rung beim Durchgang durch das Rohr führt dann zu einer außenballistisch günstigen Querschnittsbelastung.

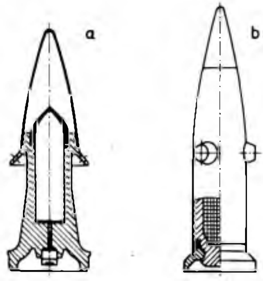


Bild 1114. *Flanschgeschosse für konische Rohre;*
a Hartkerngeschoß mit Flanschen,
b Sprenggranate mit Stauchnoppen und Heckflansch.

Das aus einem konischen Rohr verschossene Geschoß besitzt gegenüber einem Treibkäfiggeschoß den Vorteil, daß keine abfliegenden Teile vor der Mündung auftreten; außerdem ist sein Aufbau einfacher. Die Leistung der Treibkäfigausführungen wird jedoch bei gleichem Nennkaliber normalerweise nicht erreicht werden können; ferner ist der erhöhte Verschleiß der Rohre und ihre aufwendige Fertigung ein nachteiliger Faktor.

11.2.4. Pfeilgeschosse

Pfeilgeschosse sind Artilleriegeschosse mit einer gegenüber dem Durchmesser extrem großen Länge ($l/d = 10$ bis 20). Sie sind in der Regel als Unterkalibergeschosse ausgeführt, jedoch sind auch kalibergleiche Arten bekannt. Beide Arten sind grundsätzlich flügelstabilisiert.

Ihre Bauweise gestattet im Verhältnis zum Rohrkaliber sehr geringe Geschoßgewichte und hohe Anfangsgeschwindigkeiten; die großen Baulängen ergeben ein optimales Querschnittsverhältnis und damit geringe Geschwindigkeitsverluste.

Unterkalibrige Pfeilgeschosse sind schon mit Flugdurchmessern bis herunter zu etwa 20 bis 25 % des Rohrdurchmessers verwirklicht worden; man nennt solche Geschosse dann auch „Nadelgeschosse".

Nachstehend werden mit dem Röchlinggeschoß und dem Peenemünder Pfeilgeschoß zwei Entwicklungen aus der Zeit des Zweiten Weltkrieges beschrieben und anschließend wird auf eine moderne Entwicklung, das Rheinmetall-Ferngeschoß, eingegangen.

11.2.4.1. Das Röchlinggeschoß

Die Firma Röchling, Völklingen (Saar), hat im Zweiten Weltkrieg erstmalig Pfeilgeschosse für den Überschallgeschwindigkeitsbereich praktisch verwirklicht. Kennzeichen der Röchlinggeschosse waren die „Wickelflossen" oder das „Wickelleitwerk". Die Wickelflossen bestanden aus elastischen Stahlblechen, die um den hinteren Teil des Geschosses herumgewickelt waren. Beim Transport und beim Schuß, d.h. beim Durchgang durch das Geschützrohr, wurden die Flossen durch eine Hülse zusammengehalten; deshalb konnten die Geschosse aus gezogenen Rohren verschossen werden. Nach dem Verlassen der Mündung wurde die Hülse nach hinten abgestreift, so daß sich die Flossen zu einem echten Überkaliberleitwerk aufrichten konnten.

Röchlinggeschosse, kurz Rö-Geschosse genannt, wurden in den verschiedensten Kalibern und für die verschiedensten Verwendungszwecke ausgeführt, und zwar als unterkalibrige und als kalibergleiche Geschosse. Außergewöhnliche Bedeutung erlangten sie wegen ihrer sehr großen Durchschlagskraft vor allem als Betongranaten.

Bild 1115 a zeigt ein unterkalibriges Röchlinggeschoß mit Treibscheibe und Zentrierring (Stützring), Bild 1115 b eine kalibergleiche Ausführung. Die Tabelle 1101 enthält die Hauptdaten zweier unterkalibriger Röchlinggeschosse.

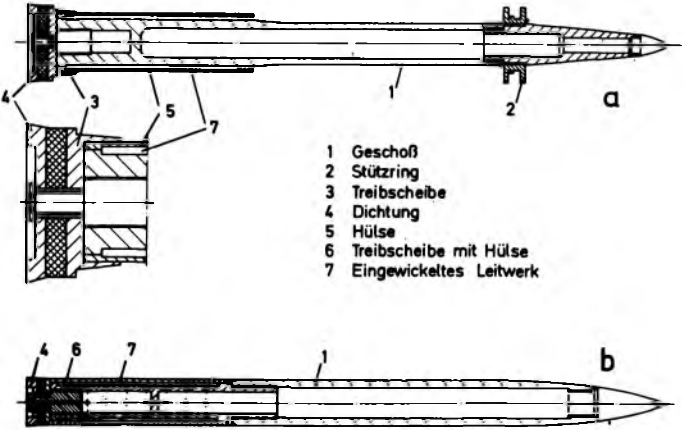


Bild 1115. *Röchlinggeschosse;*
a unterkalibrig, b kalibergleich.

Tabelle 1101. *Hauptdaten zweier unterkalibriger Röchlinggeschosse.*

Waffe	Geschoß-kaliber (cm)	Geschoß-länge (m)	Geschoß-gewicht (kg)	Eindring-tiefe in Mergelboden (m)
21-cm-Mörser	12	2,2	180	60
35-cm-Mörser	22	3,6	1000	über 100

11.2.4.2. Das Peenemünder Pfeilgeschoß

Wesentliche Entwicklungsarbeiten an Pfeilgeschossen wurden während des Zweiten Weltkrieges in Peenemünde geleistet. Hier wurden Pfeilgeschosse für die verschiedensten Kaliber entwickelt, z.B. für die K 5 (28 cm), die K 3 (24 cm) und die schwere Feldhaubitze (15 cm). Das Bild 1116 zeigt ein Peenemünder Pfeilgeschoß für das Ferngeschütz K 5 im Ladezustand und im Flugzustand (ohne Treibscheibe und Führungsring). Die bei diesem Geschütz erreichten Daten des Pfeilgeschosses sind in der Tabelle 1102 den Daten einer 28-cm-Normalgranate gegenübergestellt.

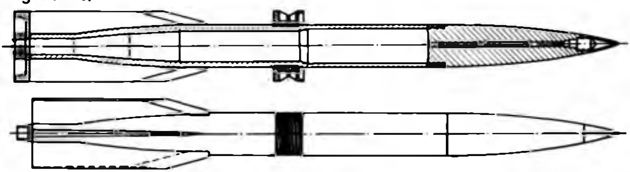


Bild 1116. *Peenemünder Pfeilgeschoß für das Ferngeschütz K 5; oben Geschoß im Ladezustand, unten Geschoß im Flugzustand.*

Tabelle 1102. *Geschoßdaten des Ferngeschützes K 5.*

	Normalgranate (28-cm-Granate 35)	Peenemünder Pfeilgeschoß (17-cm-Treibspiegelgeschoß)
Geschoßgewicht im Rohr	255 kg	275 kg
Geschoßgewicht im Flug	255 kg	250 kg
Gewicht der Treibspiegelteile	—	25 kg
Mündungsgeschwindigkeit	1120 m/s	1135 m/s
Max. Schußweite	60 km	90 km
Geschwindigkeit im Ziel (bei max. Schußweite)	535 m/s	850 m/s

Die in Peenemünde entwickelten Geschosse sollten sowohl für glatte als auch für gezogene Rohre geeignet sein. Es kann hier nicht gesagt werden, wieweit die anfänglichen Schwierigkeiten beim Schießen aus gezogenen Rohren (große Streuungen, wahrscheinlich infolge unterschiedlicher Drallaufnahme) noch behoben werden konnten.

In den USA werden heute nach dem Peenemünder Prinzip Pfeilgeschosse als Sonden zur Erforschung der Atmosphäre in große Höhen geschossen. Zu diesem Zweck wurden alte Geschützrohre, u.a. Schiffsgeschützrohre bis zu einem Kaliber von 16 Zoll (= 406 mm), glattgebohrt; teilweise wurden diese Rohre noch durch Vorsatzstücke verlängert, um besonders hohe Mündungsgeschwindigkeiten zu erreichen. Mit einer derart hergerichteten 16-Zoll-Kanone wurden die in der Tabelle 1103 angegebenen Leistungen erreicht.

Tabelle 1103. *Leistungen einer 16-Zoll-Kanone mit Peenemünder Pfeilgeschossen.*

Rohrdurchmesser	406 mm
Rohrlänge	36,5 m
Rohrlänge	90 Kal.
Gewicht des Rohres	200 t
Geschoßgewicht, vollst.	186 kg
Geschoßgewicht im Flug	84 kg = 45 % } des gesamten Geschoßgewichtes
Treibspiegelgewicht	102 kg = 55 % } des gesamten Geschoßgewichtes
Treibladung	445 kg = 240 % } des gesamten Geschoßgewichtes
Max. Gasdruck	3300 bar
Mündungsgeschwindigkeit	1855 m/s
Mündungsgeschwindigkeit	1900 m/s (bei evakuiertem Rohr)
Schußhöhe } bei nahezu senkr. Schuß	131000 m
Schußhöhe } bei nahezu senkr. Schuß	143000 m (bei evakuiertem Rohr)

11.2.4.3. Das Rheinmetall-Ferngeschoß

Das Prinzip der Peenemünder Pfeilgeschosse ist in den 60er Jahren von Rheinmetall wieder aufgegriffen worden. Es wurde ein unterkalibriges, flügelstabilisiertes Langgeschoß für ein Rohrkaliber von 155 mm entwickelt, das unter dem Namen Rheinmetall-Ferngeschoß bekannt ist.

Bild 1116a zeigt das Geschoß im Ladezustand, d. h. mit Treibscheibe und Stützring.

Die kalibergleiche Treibscheibe ermöglicht die Übernahme der Ansetzkräfte und die Verwendung von Standardtreibladungen. Nach dem Verlassen der Mündung löst sie sich selbsttätig vom Geschoß.

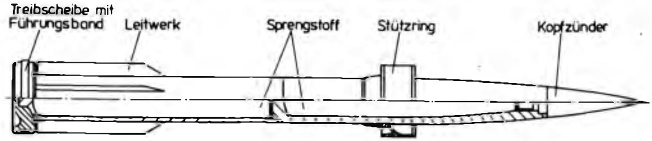


Bild 1116a. *Rheinmetall-Ferngeschoß im Ladezustand.*

Der Stützring zur Führung des Geschosses während seines Durchgangs durch das Rohr besteht aus mehreren Segmenten, die im Ladezustand durch ein Gleitband zusammengehalten werden. Nach dem Verlassen des Rohres reißt das Gleitband infolge der Luftanströmung an den Sollbruchstellen, so daß sich die Segmente vom Geschoß lösen und abfliegen.

Zur Stabilisierung des Fluges ist am Geschoßheck ein kalibergleiches festes Leitwerk angebracht.

Das Rheinmetall-Ferngeschoß kann sowohl aus glatten als auch aus gezogenen Rohren verschossen werden, und zwar, wie Versuche ergaben, mit guten Treffbildergebnissen. Die erreichten Schußweiten übertrafen diejenigen von Standardsprenggeschossen um rd. 30%.

11.2.5. Überkalibergeschosse

Darunter versteht man Geschosse, die einen größeren, in einigen Fällen einen etwa 10fach größeren Durchmesser haben als das Rohr, mit dem sie verschossen werden. Dadurch können große Gefechtsköpfe mit Hilfe kleiner Rohrwaffen ins Ziel gebracht werden. Da die Anfangsgeschwindigkeit solcher Geschosse und damit auch ihre Reichweite aber äußerst gering sind, spielen überkalibrige Geschosse heute nur noch eine untergeordnete Rolle.

Ein Überkalibergeschoß ist z.B. die in Bild 1111 dargestellte Gewehrgranate, die als flügelstabilisiertes Hohlladungsgeschoß vom Infanteriegewehr verschossen wird.

Ein anderes Überkalibergeschoß ist das „Stielgeschoß" (Bild 1117), das ebenfalls von einem Infanteriegewehr verschossen wird. Sein Gefechtskopf, eine Gewehrgranate, ist meist fest mit einem rohrkalibergleichen Schaft verbunden, der von vorn in das Waffenrohr eingeführt wird.



Bild 1117. *Stielgeschoß (Gewehrgranate).*

Beim Überkalibergeschoß nach Bild 1118 wird das Prinzip des „umgekehrten Geschützes'' verwandt: Das flügelstabilisierte Geschoß, eine Wurfgranate, ist als Rohr ausgebildet, das über ein Abschußrohr oder einen Abschußstempel gestülpt wird.

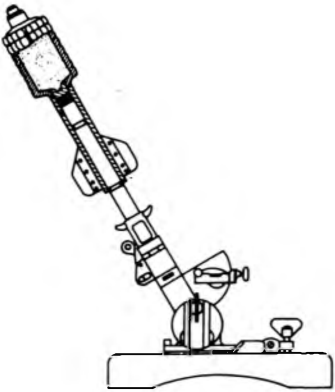


Bild 1118. *Wurfgranate 16 auf dem Granatenwerfer.*

11.2.6. Nachbeschleunigte Geschosse

Nachbeschleunigte Geschosse besitzen im Geschoßheck einen Raketenmotor, der nach Verlassen des Rohres gezündet wird und das Geschoß weiter antreibt. Es handelt sich im Prinzip also um rohrverschossene Raketen.

Mit Hilfe dieser Anordnung läßt sich zweierlei erreichen: Einmal lassen sich bei bestehenden Rohrwaffen Leistungssteigerungen, d.h. größere Schußweiten oder kürzere Flugzeiten und damit rasantere Flugbahnen erzielen. Ein Beispiel dafür ist das 155-mm-RAP-Geschoß (Bild 1119) mit einer Reichweitensteigerung gegenüber dem Sprenggeschoß von mehr als 20 %.

Zum anderen lassen sich bestimmte, für ein Geschoß festgelegte ballistische Forderungen mit einem Rohrwaffensystem realisieren, das infolge der niedrigeren notwendigen Abschußbeanspruchung unterdimensioniert werden kann und somit kleinere Abmessungen und weniger Gewicht aufweist. Ein Beispiel dafür sind infanteristische Einmann-Panzerabwehrwaffen, von denen eine große wirksame Kampfentfernung, hohe Treffgenauigkeit und damit eine rasante Flugbahn bei geringem Waffengewicht und kleinen Abmessungen gefordert werden.

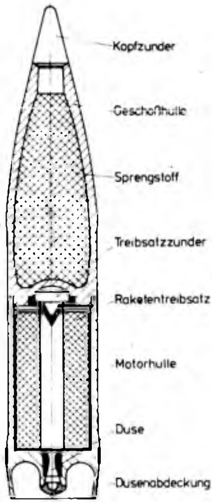


Bild 1119.
155-mm-RAP-Geschoß (Rocket Assisted Projectile).

Nachbeschleunigte Geschosse können drallstabilisiert oder flügelstabilisiert verschossen werden. Hinter dem Gefechtskopf, der meist eine Sprengladung oder Hohlladung zur Panzerbekämpfung trägt, ist der Festtreibstoff-Raketenmotor angeordnet, der über einen Verzögerungssatz durch die Pulvergase der Rohrtreibladung gezündet wird, wenn das Geschoß das Rohr verlassen hat (Bild 1119).

Je nach Schubleistung der Nachbeschleunigungstriebwerke unterteilt man diese in sog. Booster oder Marschtriebwerke. Ein Booster erzeugt kurzzeitig einen hohen Schub, der das Geschoß von seiner Mündungsgeschwindigkeit auf eine wesentlich höhere Brennschlußgeschwindigkeit beschleunigt. Ein Marschtriebwerk dagegen ist so ausgelegt, daß sein Schub den Luftwiderstand gerade auskompensiert, so daß während der Brennzeit die Fluggeschwindigkeit nahezu gleich der Mündungsgeschwindigkeit bleibt. Die Brennzeit eines Marschtriebwerkes ist bei gleichen Abmessungen wesentlich länger als die eines Boosters, da der Treibstoffverbrauch je Zeiteinheit entsprechend der Schubleistung geringer ist. Für Einzelheiten zu der Auslegung von Raketentriebwerken siehe Kap. 12, Raketen.

Rohrverschossene nachbeschleunigte Geschosse besitzen gegenüber Raketen verschiedene Vorteile:

Die Mündungsgeschwindigkeit ist wesentlich höher (meist 10fach und mehr) als die Abgangsgeschwindigkeit von einem Startgestell. Damit

entfällt in hohem Maße die Störanfälligkeit durch Querwinde, wie sie bei der Rakete gegeben ist.

Die Auslegung der Geschosse mit einem Marschtriebwerk macht sie aerodynamisch querwindunempfindlich, wenn der Schub genau den Luftwiderstand kompensiert.

Flugbahnabweichungen durch auf Fertigungsungenauigkeiten basierende Schubvektorfehler lassen sich durch den im Rohr übertragenen Drall auf besonders einfache Weise verhindern.

Die Geschosse können kürzer und verhältnismäßig leicht gebaut werden, da der wesentliche Anteil der Fluggeschwindigkeit im Rohr erzeugt wird, d.h. durch eine nicht mitzuführende Treibladung.

11.2.7. Trägergeschosse

Hierunter werden Geschosse verstanden, die ein oder mehrere Gefechtsköpfe oder sonstige Wirkteile über eine weite Strecke in das Zielgebiet tragen und dort mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausstoßen. Trägergeschosse kommen zum Einsatz, wenn es gilt, größere Flächen wirkungsvoll zu bekämpfen, ohne den genauen Standort eines oder mehrerer Ziele zu kennen, oder wenn infolge zu großer Schußentfernung ein Ziel nicht mehr im Punktfeuer, d.h. mit ausreichender Treffsicherheit, bekämpft werden kann.

Die ausgestoßenen Wirkteile können dabei verschiedene Aufgaben erfüllen; sie können gegen weiche Ziele wirken oder Gefechtsköpfe zur Bekämpfung gepanzerter Ziele enthalten.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit für Trägergeschosse besteht darin, über große Entfernungen Wirkteile für Sonderaufgaben (Leuchtkörper, Nebelbüchsen usw.) zu transportieren. Außerdem ist es möglich, mit Hilfe derartiger Trägergeschosse aus der Tiefe ein bestimmtes Gebiet mit Minen zu belegen, um so Aufmarsch- und Rückzugbewegungen des Gegners zu stören.

Die Wirkteile werden entweder nach hinten oder radial aus der Trägerhülle ausgestoßen. Je nach der Ausstoßrichtung ist die Ausstoßladung im Kopf oder im Zentrum des Trägergeschosses untergebracht; sie wird über einen Zeit- oder Bodenabstandszünder gezündet. Der Drall des Gesamtgeschosses sowie gegebenenfalls ein Nacheinanderausstoßen verschiedener Wirkteillagen begünstigen die Verteilung der Wirkteile auf eine größere Fläche im Zielgebiet.

11.2.8. Sondergeschosse

Unter Sondergeschossen werden hier Geschosse verstanden, die nicht eigentliche Gefechtsaufgaben erfüllen, sondern dazu Hilfestellung leisten. Hierzu gehören Signalgeschosse, wie Rauch- und Zielmarkierungsgeschosse, Nebelgeschosse und Leuchtgeschosse.

Als Weiterentwicklung solcher Geschosse sind die Minenstreugeschosse zu nennen (s. S. 493).

Bei den *Signal- und Nebelgeschossen* wird ein farbiger Rauchsatz oder ein Nebelsatz[1] entweder beim Ausstoß auf der Flugbahn (Bild 1120a) oder beim Bodenaufschlag (Bild 1120b) zum Zünden gebracht, der die erforderliche Rauch- oder Nebelschwadenbildung hervorruft.

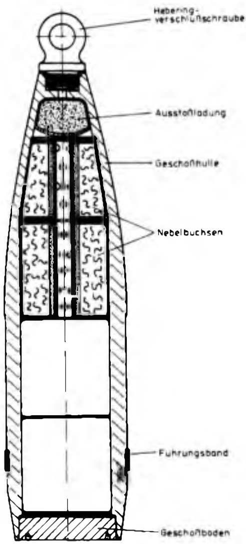


Bild 1120a.
Nebelgeschoß mit Nebelbüchsen.

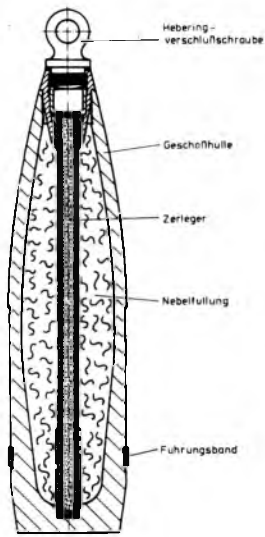


Bild 1120b.
Nebelgeschoß mit Zerlegerladung.

---

1) Vgl. Explosivstoffe, 1.5.2.

Von *Leuchtgeschossen* sind in den Bildern 1121a und 1121b zwei verschiedene Ausführungen dargestellt. Die Artillerie verwendet normalerweise ein Leuchtgeschoß mit Fallschirm (Bild1121a). Der Leuchtsatz wird in einer relativ großen Höhe durch eine Ausstoßladung nach hinten ausgestoßen; er beleuchtet während des Niederschwebens am Fallschirm das Gefechtsfeld von oben.

Ein eigens für den Panzerkampf, d.h. für die Ausleuchtung kleiner Ziele von Rheinmetall entwickeltes Leuchtgeschoß ist in Bild 1121b dargestellt. Das Geschoß wird hinter das Ziel geschossen, wobei der Leuchtsatz in geringer Höhe (50 bis 100 m) ausgestoßen wird und rasch zu Boden fällt. Infolge einer verzögerten Anzündung brennt er erst am Boden und läßt das Ziel als Silhouette gegenüber dem erhellten Hintergrund erscheinen, während die eigene Feuerstellung von der Ausleuchtung nicht erfaßt wird.

Wegen Einzelheiten zu den Leuchtsätzen wird auf das Kap. Explosivstoffe, 1.5.1, verwiesen.

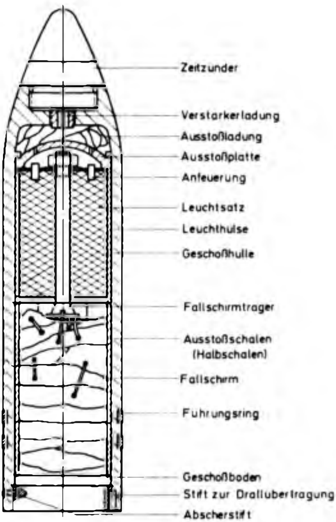


Bild 1121a.
Leuchtgeschoß mit Fallschirm.

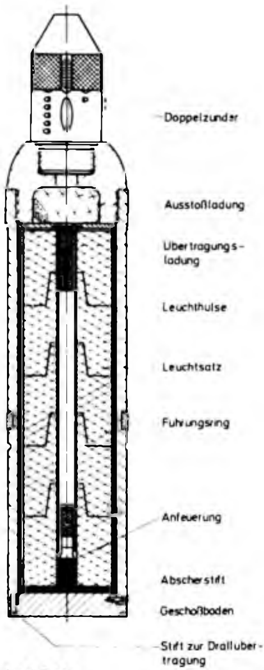


Bild 1121b.
Leuchtgeschoß ohne Fallschirm.

Bei den *Minenstreugeschossen* unterscheidet man im wesentlichen zwei Arten, und zwar einmal Geschosse, die *aktiv* wirkende Minen enthalten (z. B. HL-Bomblettes), und zum andern Geschosse mit *passiv* wirkenden Minen (sog. Lauermunition).

Bei den *aktiv* wirkenden Minenstreugeschossen werden solche Minen auf der Flugbahn ausgestoßen, die bei direktem Auftreffen auf das Ziel zur Wirkung kommen. Die *passiv* wirkenden Minen belegen nach dem Ausstoß aus der Geschoßhülle ein Vorfeld und sprechen erst beim Überfahren durch Fahrzeuge oder dgl. an.
Die Tendenz geht dahin, Minen zu streuen, die sowohl aktiv als auch passiv wirken.

Bild 1121c zeigt ein Minenstreugeschoß.

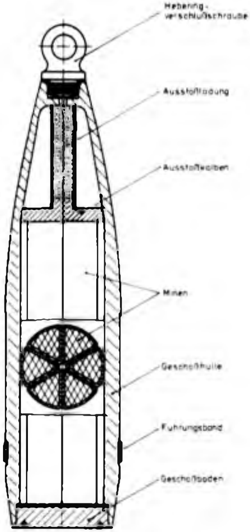


Bild 1121c. *Minenstreugeschoß.*

11.3. Die Treibladungshülse

Ein wichtiger Bestandteil der Patronenmunition ist neben dem Geschoß die Treibladungs- oder Patronenhülse. Sie hat zwei wesentliche Funktionen: Einmal stellt sie eine stabile Verbindung von Ladung und Geschoß zu einer ladefähigen Einheit dar und zum andern soll sie die Abdichtung zwischen Ladungsraum und Verschluß gegen die Verbrennungsgase sicherstellen.

Damit ergibt sich eine Reihe von Forderungen an die Treibladungshülse.

Eng tolerierte Abmessungen sind notwendig, um die Ladefähigkeit der Patrone zu gewährleisten und ihren genauen Sitz im Ladungsraum festzulegen. Dieser genaue Sitz ist u.a. wichtig für das gleichmäßige Anschlagen des Schlagbolzens auf das Zündhütchen.

Die Treibladungshülse muß der Beanspruchung durch den hohen Gasdruck standhalten. Sie muß genügend Elastizität besitzen, um unter Einwirkung des hohen Druckes gut abzudichten (zu lidern), darf jedoch später beim Ausziehen nicht klemmen.

Das Gewicht der Hülse soll möglichst gering sein.

Die Treibladungshülse muß korrosionsbeständig gegen das Treibladungspulver sein.

Der Hülsenmund muß gut verformbar sein, um eine gleichmäßig feste Verbindung zwischen Geschoß und Hülse durch Einwürgen zu gewährleisten.

Bild 1122 zeigt die gebräuchlichsten Formen von Patronenhülsen, die Bundhülse und die Hülse mit Anlage an der Schulter.

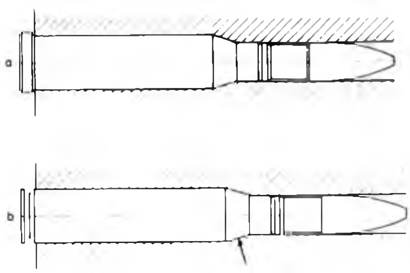


Bild 1122. *Treibladungs- (Patronen-)Hülsen;*
a Bundhülse, b Hülse mit Anlage an der Schulter.

Die Bundhülse (Fig. a) gewährleistet den genauen Sitz der Patrone im Ladungsraum durch die Bundanlage. Der vorstehende Bund erschwert allerdings etwas die Führung der Patrone; außerdem erfährt die Patrone bei der Anlage des Bundes an die Stirnfläche des Patronenlagers einen harten Stoß.

Bei der Treibladungshülse nach Fig. b wird der genaue Sitz durch die Anlage an der Schulter (Pfeil) bestimmt. Zuweilen differiert der Anlagewinkel von Patronenlager und Hülsenschulter etwas, so daß sich die Hülse beim Zuführen der Patrone an dieser Stelle etwas plastisch verformen und damit den Zuführstoß abfangen kann.

Bei der Entwicklung von Patronenmunition verwendete man zunächst Treibladungshülsen aus Messing. Dieser Werkstoff war für das Herstellen der Hülse durch Tiefziehen besonders geeignet und bewirkte durch gute mechanische Eigenschaften (Elastizitätsmodul) eine gute Rückfederung nach dem Abschuß, die ein Klemmen verhinderte. Wegen des vergleichsweise hohen Preises von Messing und der begrenzten Rohstoffbasis ist man später auf Stahlhülsen übergegangen, die heute für Automatenmunition vorwiegend verwendet werden.

Als weiterer Entwicklungsschritt ist die breitere Verwendung von Aluminiumlegierungen als Hülsenwerkstoff auch bei Hochleistungsmunition anzusehen.

11.3.1. Fertigung von Treibladungshülsen

Entsprechend der Bedeutung der Treibladungshülsen als wichtiges Element der Patronenmunition erfordert ihre Fabrikation einen verhältnismäßig großen technischen Aufwand und ein Höchstmaß an Präzision.

Um in etwa einen anschaulichen Überblick davon zu vermitteln, wird nachstehend die Fertigung einer 20-mm-*Stahlhülse* anhand des Bildes 1123 verfolgt. Die Randziffern des Textes stimmen mit denen der Zeichnung überein.

Als Ausgangswerkstoff dient ein aluminiumberuhigter, warmgewalzter, in der Stange angelieferter Stahl mit einer Zugfestigkeit von etwa 440 N/mm^2 und einer Dehnung δ_5 [1] von über 30 %.

1 Das angelieferte Stangenmaterial wird auf die für den Fertigungsprozeß notwendige Länge abgesägt und in Trommeln entgratet.

---

1) δ_5 ist die Bruchdehnung für einen Probestab mit einer Meßlänge vom fünffachen Durchmesser.

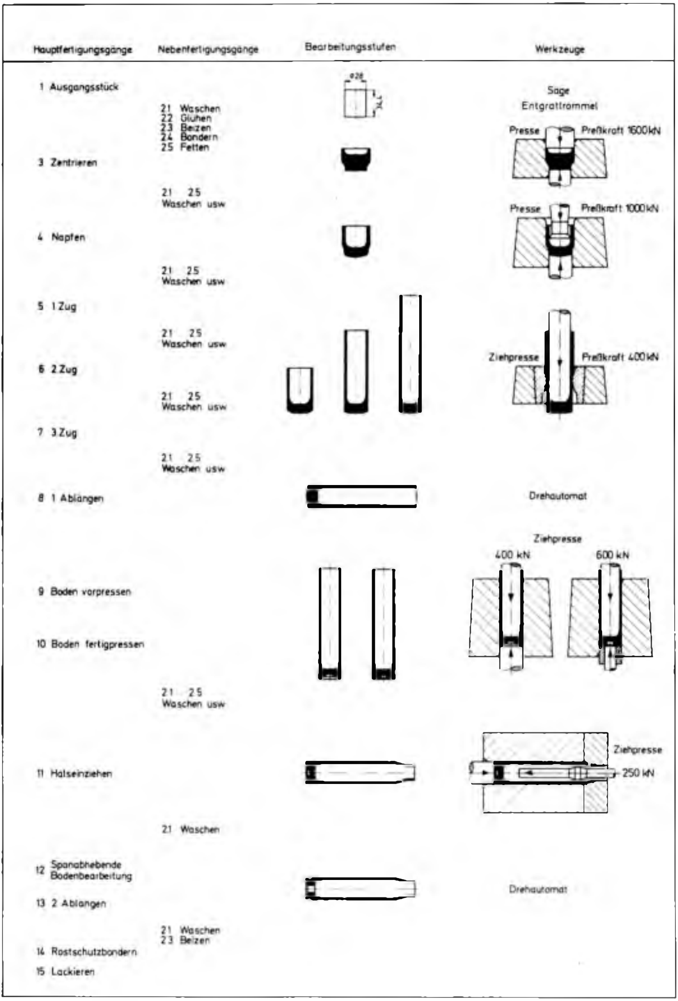


Bild 1123. *Fertigung einer 20-mm-Treibladungshülse aus Stahl.*

2 Die Nebenfertigungsvorgänge 2.1 bis 2.5, nämlich Waschen, Glühen, Beizen, Bondern und Fetten, wiederholen sich vor jeder weiteren Kaltverformung.

2.1 Das Waschen der nach jeder Bearbeitungsstufe anfallenden Stücke in alkalischen Bädern verhindert eine Geruchs- und Rauchbelästigung beim anschließenden Glühen.

2.2 Beim Glühen unterscheidet man fünf verschiedene Glühprozesse:

Das anfängliche Normalglühen der abgesägten Ausgangsstücke bei rd. 850° soll die vom Walzvorgang herrührenden Festigkeitsschwankungen und die unterschiedlichen Gefügeausbildungen beseitigen.

Das Rekristallisationsglühen bei rd. 950° beseitigt die durch die jeweilige Verformung entstandene Kaltverfestigung und bringt das Material in die Ausgangsfestigkeit zurück.

Der unterschiedliche Verformungsgrad und die unterschiedlichen Wandstärken nach den einzelnen Verformungsvorgängen erfordern beim Glühen verschieden langes Halten der Rekristallisationstemperatur; zu langes Halten der Rekristallisationstemperatur führt zur unerwünschten Grobkornbildung; die Rückführung in feinkörniges Gefüge erfolgt durch Normalisieren (Ausgleichglühen) mit anschließender Abkühlung in Wasser. Das nachfolgende Weichglühen bei rd. 750° wird notwendig, um die bei der Wasserkühlung entstandene Aufhärtung wieder zu beseitigen.

Durch induktives, aber nur partielles Glühen im Bereich des Hülsenhalses nach dem dritten Zug wird erst die Formgebung des Halses ermöglicht.

2.3 Die beim Glühprozeß verzunderte Oberfläche wird in einem aus verdünnter Schwefelsäure bestehenden Warmbad abgebeizt.

2.4 Das Aufbringen einer Phosphatschicht durch „Gleitbondern" dient der Schmierung zwischen Werkzeug und Werkstück während der Umformprozesse. Diese Phosphatschicht ist wesentlich poröser als die blanke Stahloberfläche, so daß in ihren Poren zusätzliche Schmiermittel aufgenommen werden können.

2.5 Nach dem Bondern werden die Stücke in ein Warmbad eingetaucht und gefettet; das Bad besteht aus in Wasser gelösten, verseiften organischen Fetten, z.B. Rindertalg, die eine hohe Flächenpressung zulassen.

3 Das Zentrieren, als erster und wichtigster Fertigungsgang der Umformung, erfolgt im Fließpreßverfahren. Um Schwankungen in

der Wandstärke, die sich bis zum letzten Ziehvorgang fortsetzen würden, zu vermeiden, ist das Spiel zwischen Stempel und Matrize sehr klein.

4 Beim Napfen, das ebenfalls eine Umformung durch Fließpressen darstellt, wird der Stempel nicht mehr zwangsläufig durch die Matrize, sondern durch die bereits beim Zentrieren gebildete Werkstückwand geführt.

5 Das weitere Umformen erfolgt nicht mehr durch Fließpressen,
6 wie beim Zentrieren und Napfen, sondern durch dreimaliges
7 Tiefziehen. Dabei werden in die Teile nacheinander drei verschiedene Dorne eingeführt, die sie durch entsprechende Ziehringe hindurchschieben; bei jedem Zug verkleinern sich Außen- und Innendurchmesser, die Wandstärke nimmt ab und die Hülse längt sich.

8 Damit die Hülsenform in jedem Falle erreicht wird, muß bei den Umformverfahren mit Materialüberschuß gearbeitet werden. Das überschüssige Material wird abgestochen (erstes Ablängen).

9 Das Vor- und Fertigpressen des Bodens im kalten Zustand gibt
10 der Bodenpartie die notwendige Festigkeit.

11 Die Hülse wird in eine konische Form, die den Abmessungen des Patronenlagers entspricht, gepreßt. Dabei zieht sich der Hülsenhals ein und gleichzeitig wird der Halsquerschnitt durch Hindurchschieben einer Kalibernuß kalibriert.

12 Auf einem Drehautomaten wird der Hülsenboden plangedreht und das Gewinde mit der Einsenkung zur Aufnahme der Zündschraube sowie die Ausziehnut eingearbeitet.

13 Der Hülsenmund wird auf die richtige Länge abgestochen (zweites Ablängen).

14 Durch Rostschutzbondern wird eine porenfreie, feinkristalline Phosphatschicht auf die Hülse gebracht.

15 Abschließend wird die Hülse innen wie außen lackiert und der Lack in Durchlauföfen bei 220° eingebrannt. Der Lack schützt die Hülse vor Korrosion; der Außenlack muß zusätzlich gute Gleiteigenschaften aufweisen.

11.4. Munitionsarten

Die in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Munitionselemente (Geschosse und Treibladungshülsen) bilden den Sammelbegriff

Munition; diese wird im folgenden bezüglich ihrer spezifischen Eigenheiten wie Aufbau, Einsatzbedingungen und Entwicklungstendenzen näher betrachtet.

Im einzelnen werden folgende Arten behandelt:

Munition für Handfeuerwaffen und Maschinengewehre,
Munition für Maschinenkanonen,
Munition für Panzer und die Panzerabwehr,
Munition für Artilleriezwecke sowie
Munition für den Bereich der Übungs- und Darstellungsaufgaben.

Zum Schluß sind kurz die Handgranaten und die Fliegerbomben (die „Abwurfmunition") erwähnt.

11.4.1. Munition für Handfeuerwaffen und Maschinengewehre

Die für diese Waffen verwendeten Kaliber zählen bis 15,24 mm (= 0,6 Zoll); sie verschießen ausschließlich Patronenmunition.

Die einzelnen Geschoßarten sind unter 11.2.1 beschrieben.

Die *Patronenhülsen* sind vorwiegend aus Messing hergestellt; sie enthalten als Treibladung ein Schüttpulver in Kugel-, Blättchen- oder Röhrchenform. Die Anfeuerung erfolgt durch ein in den Hülsenboden eingepreßtes Schlagzündhütchen.

Die *Durchschlagsleistung* von Infanteriemunition ist in der Tabelle 1104 für Weichkerngeschosse (Bild 1101 a) zusammengestellt. Es handelt sich dabei um Mittelwerte, die im Einzelfall bis um 20 % überschritten werden.

Die Durchschlagsleistung von Stahlkerngeschossen (Bild 1101 b) liegt je nach Schußentfernung um etwa 15 bis 25 % höher.

Die *Entwicklungstendenz* infanteristischer Handfeuerwaffen läuft auf möglichst kleine Patronen- und Waffenabmessungen hinaus. Dazu zeigen Bild 1124 und Tabelle 1105 einen Vergleich zwischen der deutschen Standardpatrone Kaliber 7,9 mm sS (schweres Spitzgeschoß) des Zweiten Weltkrieges, der augenblicklich im NATO-Bereich eingeführten Patrone Kaliber 7,62 mm und einer der neuen kleinkalibrigen Patronen (Kaliber 5,56 mm), die die NATO-Patrone ggf. ablösen soll.

Tabelle 1104. *Durchschlagsleistung von Weichkerngeschossen.*

Zielmaterial	Entfernung in m			
	5	300	600	1200
	Durchschlagsleistung in cm			
Tannenholz	60	50	40	35
Sand	30	40	40	30
Ackerboden	60	70	60	50
Stahlblech	1,0	0,5	0,15	–

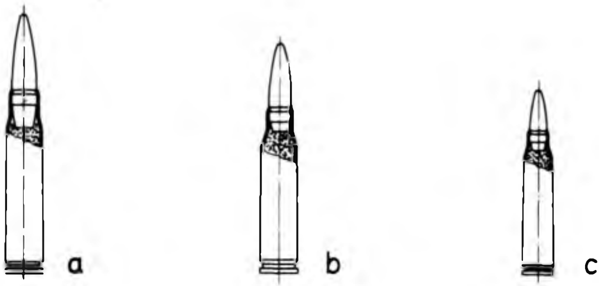


Bild 1124. *Entwicklungstendenz der Infanteriepatrone;*
a Standardpatrone Kal. 7,9 mm sS,
b NATO-Patrone Kal. 7,62 mm,
c Patrone Kal. 5,56 mm.

Kleinkalibrige Munition und dementsprechend leichtere Geschosse werden hauptsächlich deshalb bevorzugt, weil sie geringere Rückstoßimpulse auf die Waffe ausüben, so daß der Schütze sie auch bei Dauerfeuer gut im Ziel halten kann.

Hinzu kommt, daß eine Patrone vom Kal. 5,56 mm z.T. weniger als die Hälfte an Volumen und Gewicht gegenüber der jetzigen NATO-Patrone aufweist. Ein Schütze kann damit die doppelte Patronenmenge bei gleichen Bedingungen mit sich führen. In der Wirksamkeit ist die kleinkalibrige Munition erst bei Schußweiten über 600 m unterlegen, auf Entfernungen bis 300 m weist sie sogar höhere Leistungen auf.

Die Verwendung hülsenloser Munition verspricht einen weiteren Schritt in Richtung der Verringerung des Gewichtes von Munition und Waffe.

Infanteriemunition für besondere Zwecke wie Manöverpatronen, Prüfpatronen u.a. werden unter 11.4.6 behandelt.

Tabelle 1105. *Vergleich dreier Infanteriepatronen.*

		Standard-Patrone 7,9x57 s S	NATO-Patrone 7,62x51	Patrone 5,56 x 44,5[1]
Kaliber	mm	7,9	7,62	5,56
Geschoßgewicht	g	12,8	9,45	3,56
Geschoßlänge	mm	35,3	28,9	19,0
Hülsengewicht	g	10,0	11,2	6,2
Hülsenlänge	mm	57,0	51,0	44,5
Patronengewicht[2]	g	26,2	23,6	11,4
Patronenlänge	mm	80,6	70,8	57,4
Ladungsgewicht	g	2,9	2,9	1,62
Anfangsgeschw. aus der Waffe	m/s	733 Kar. 98 K	780 G 3	975 AR-15
Waffengewicht	kg	4,1	4,5	2,7
Drall	Kal.	30	40	63
Max. Gasdruck	bar	3300	3300	3600
Mündungswucht	Nm	3440	2870	1690
Mündungsimpuls	kgm/s	9,4	7,4	3,5
Wirks. Schußweite[3]	m	–	700	450

1) Angaben sind nur Richtwerte
2) Angaben gelten bei Verwendung von Messinghülsen
3) Als wirksame Schußweite ist diejenige Schußweite definiert, bei der ein 1,31 mm dickes Blech von 1670 N/mm² Zugfestigkeit (Stahlhelmblech) soeben noch durchschlagen wird.

11.4.2. Munition für Maschinenkanonen

Unter Maschinenkanonen werden üblicherweise automatische Waffen mit einem Kaliber von 15,24 mm (= 0,6 Zoll) an aufwärts verstanden[1]. Aufgrund des Kalibers und des Aufbaues rechnet die MK-Munition strenggenommen schon zur Artilleriemunition.

1) Vgl. Kap. 7, Automatische Schußwaffen.

Auch für Maschinenkanonen wird, wie bei der Infanteriemunition, bis heute ausschließlich Patronenmunition mit Metallhülsen verwendet. Es zeichnen sich jedoch Entwicklungsrichtungen ab, in Zukunft auch hülsenlose Munition (kompakter Treibladungskörper einschließlich Treibladungsanzünder mit dem Geschoß fest verbunden) und später vielleicht auch flüssige Treibmittel zu verwenden.

Einen Überblick über gebräuchliche *Patronenarten* für das Kaliber 20 mm gibt Bild 1125. Kennzeichnend für Patronenmunition ist die einheitliche Form, da alle Patronen den gleichen Zuführmechanismus durchlaufen müssen. Auch der Aufbau ist innerhalb der einzelnen Kaliberbereiche im wesentlichen gleich.

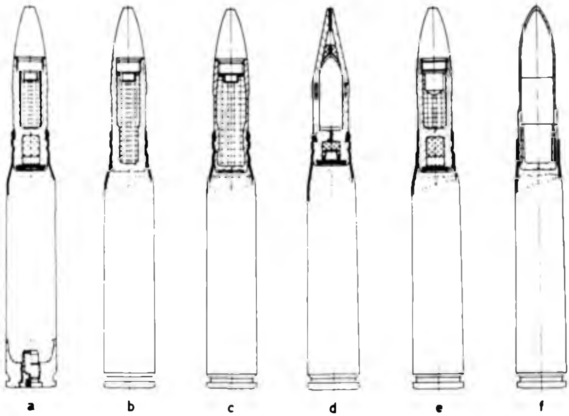


Bild 1125. *20-mm-Patronen, und zwar mit:*

a Sprengbrandgeschoß mit Leuchtspur, b Sprengbrandgeschoß ohne Leuchtspur, c Minengeschoß, d Hartkerngeschoß mit Leuchtspur, e Übungsgeschoß mit Leuchtspur, f Zerfallgeschoß.

Die dem jeweiligen Verwendungszweck entsprechend ausgebildeten *Geschosse* wie Spreng-, Sprengbrand-, Minen- und Panzergeschosse sind in den Abschnitten 11.2.2 und 11.2.3 beschrieben. Neuzeitliche Entwicklungen laufen auf den Gebieten der unterkalibrigen Treibkäfiggeschosse und der Hohlladungsgeschosse.

Als *Treibladungshülsen* für MK-Munition werden Messing- oder Stahlhülsen verwendet[1]; in Deutschland hat sich die Stahlhülse mehr und

---

1) Vgl. 11.3, Die Treibladungshülse.

mehr durchgesetzt. Durch Verwendung brauchbarer Hülsengleitlacke und durch Längsrillung des Patronenlagers läßt sich ein gleichmäßiger Ausziehvorgang erreichen. Die Gleitlacke sind speziell für die Außenlackierung von Treibladungshülsen entwickelt worden. Die beiden genannten Maßnahmen ermöglichen es, mit „trockener", d.h. nicht eingeölter Munition Dauerfeuer zu schießen; bei Verwendung gewöhnlicher Lacke neigen nicht eingeölte Stahlhülsen zu Hülsenklemmern.

Heute gehen auch Bestrebungen wieder dahin, Hülsen aus Leichtmetall herzustellen, um damit das Patronengewicht herabzusetzen.

Das *Anzündelement* ist in den Boden der Hülse eingeschraubt oder eingepreßt. Bei geringen Treibladungsmengen genügt ein Schlagzündhütchen, von etwa 30 g Ladung an wird zur gleichmäßigen und schnellen Anfeuerung eine Beiladung benötigt. Anfeuerungsladung und Anzündhütchen sind dann zu einer Einheit, dem Treibladungsanzünder, zusammengefaßt.

Geschoß und Treibladungshülse sind mit Preßsitz miteinander verbunden. Zusätzlich wird der Hülsenmund in eine oder mehrere Nuten am Geschoßzapfen eingerollt oder eingewürgt. Die Kraft, die zum Abziehen eines Geschosses von der Hülse erforderlich ist, die „Ausziehkraft" oder der „Ausziehwiderstand", beträgt bei Patronen vom Kaliber 20 mm mindestens 9000 N, bei 30 mm mindestens 12000 N. Diese verhältnismäßig feste Verbindung zwischen Geschoß und Hülse dient als Sicherung gegen eine Lockerung des Geschosses in der Hülse sowohl beim Transport als auch bei der Zuführung in die Waffe und beim Abbremsstoß im Patronenlager; darüber hinaus bewirkt sie die Ausbildung eines gewissen Gasdruckes, bevor die Geschoßbewegung beginnt.

Bisher verschießen Maschinenkanonen ausschließlich drallstabilisierte Geschosse. Wegen der hohen Abschußbeanspruchung sowie der für große Schußfolgen notwendigen Begrenzung der Patronenlänge konnte flügelstabilisierte MK-Munition bisher nicht realisiert werden; an ihrer Entwicklung wird jedoch gearbeitet.

Die Drallübertragung auf die Geschosse erfolgt durch *Führungsbänder* aus Kupfer, Kupferlegierungen, Sintereisen oder Weicheisen, die in Nuten der hinteren Geschoßhülle eingepreßt sind; Längsrillen im Nutboden verhindern ein Durchrutschen. Die Führungsbänder sind im Durchmesser so dimensioniert, daß sie sich beim Durchgang des Geschosses durch das Rohr voll in die Züge eindrücken; sie übertragen über die Leistenführung der Züge den Drall auf das Geschoß und dichten gleichzeitig gegen die Pulvergase ab. Einzelheiten über die Führungsbänder, ihre Beanspruchung und ihre Dimensionierung sind unter 11.5.1, Der Drall und die Führungsbänder, dargestellt.

Eine Zusammenstellung der wichtigsten Daten heute gebräuchlicher MK-Munition bringt die Tabelle 1106.

Tabelle 1106. *Munition für Maschinenkanonen.*

Kaliber (mm)	20	25	30	35	40
Patrone:					
Länge (mm)	213	223	285	385	543
Gewicht (kg)	0,318	0,513	0,870	1,542	2,552
Geschoß:					
Länge (mm)	91,7	108,0	139,0	186,6	206,0
Gewicht (kg)	0,122	0,180	0,360	0,535	0,960
Treibladungshülse:					
Länge (mm)	139	135	170	228	365
max. Durchm. (mm)	28,5	38	42,9	54,6	65
Gewicht (kg)	0,144	0,241	0,352	0,682	1,142
Treibladungsgewicht (kg)	0,052	0,092	0,158	0,325	0,450
Rohrlänge (Kal.)	91,8	70	81,3	90	70
Drallwinkel	5°	7°	6°	6°	6° 40'
max. Gasdruck[1)] (bar)	3400	3700	3400	3400	3000
Mündungsgeschw. (m/s)	1045	1100	1080	1175	1005
Kadenz (Schuß/min)	1000	700	650	550	240

1) Mit Kupferstauchkörper gemessen.

Eine wichtige taktische Aufgabe für Maschinenkanonen ist die Bekämpfung von Luftzielen, d.h. von sich schnell bewegenden Objekten. Die dafür erforderlichen Anforderungen sind:

große Geschoßanfangsgeschwindigkeiten und kurze Flugzeiten;
große Zahl wirksamer Splitter bei Sprenggeschossen;
große Durchschlagsleistung gegen gepanzerte Ziele;
ausreichende Wirkung durch Entzündung oder durch Splitter nach Durchdringung einer Panzerung;
geringe Patronenabmessungen und -gewichte, um auf beschränktem Raum größere Vorräte mitführen zu können;
hohe Schußfolgen.

Im Bild 1126 ist die Anzahl der wirksamen Splitter in Abhängigkeit von der Entfernung vom Sprengpunkt für Munition vom Kaliber 20 bis 40 mm graphisch dargestellt. Als wirksame Splitter werden diejenigen definiert, die ein Stahlblech von 1,5 mm Dicke durchschlagen.

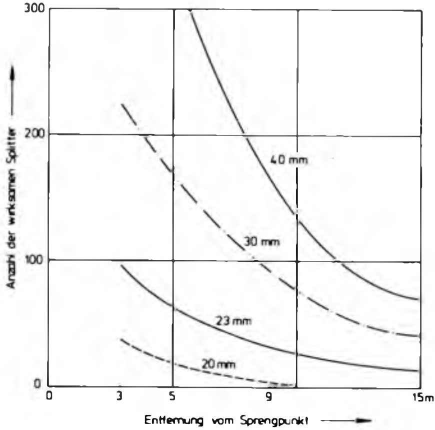


Bild 1126. *Anzahl der wirksamen Splitter in Abhängigkeit von der Entfernung vom Sprengpunkt.*

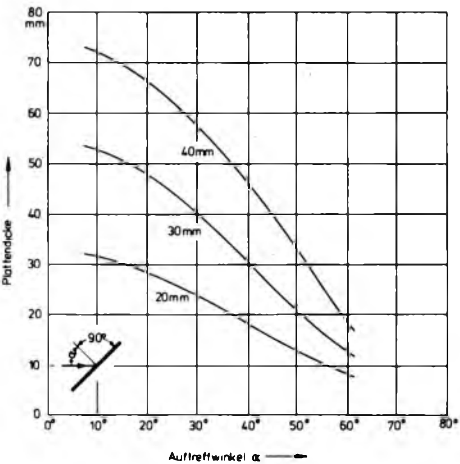


Bild 1127. *Panzerdurchschlagsleistung in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel.*

Bild 1127 zeigt die Panzerdurchschlagsleistung, d.h. die Plattendicke, die in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel gerade noch durchschlagen wird. Die Kurven gelten für Hartkernmunition (HVAP) vom Kaliber 20 bis 40 mm und für etwa 1000 m Schußentfernung.

Die Tendenz bei der Entwicklung von Maschinenkanonen zur Bekämpfung tieffliegender Objekte, leichtgepanzerter Fahrzeuge und anderer Bodenziele zielt auf eine Steigerung der Wirksamkeit, d. h. eine Verbesserung der Treffgenauigkeit und, damit verbunden, eine Erhöhung der Zerstörwirkung des Einzelgeschosses hin. Hierbei spielen z.B. auch der Einsatz unterkalibriger TK-Munition für den Panzerdurchschlag und vielleicht auch die Verwendung von Annäherungszündern eine wichtige Rolle.

11.4.3. Panzermunition

Unter Panzermunition wird die Munition zusammengefaßt, die aus der Hauptwaffe mittlerer und schwerer Kampfpanzer sowie aus den Jagdpanzern und den Panzerabwehrkanonen verschossen wird.

Grundsätzlich wird unter Panzermunition Gefechts-, Übungs- und Manövermunition verstanden; der Übungsbedarf wird möglichst mit Munition gedeckt, die mit angepaßter Ballistik die Gefechtsmunition im Treffverhalten bis zu einer bestimmten Entfernung simuliert, ggf. über diese Entfernung hinaus eine verkürzte Reichweite hat und billiger ist.

Die erforderliche Leistung einer Waffe, die sich u.a. in der Durchschlagsleistung der panzerbrechenden Geschosse ausdrückt, orientiert sich vor allem an der Stärke und Güte der Panzerung eines potentiellen Gegners.

Aufgrund der entscheidenden Bedeutung der Panzerwaffe ist auf diesem Gebiet der Munitionsentwicklung und dem des ballistischen Schutzes der Panzerungen der Wettlauf zwischen einer Waffe und ihrer Abwehr am sinnfälligsten dokumentiert: Soeben zu Ende geführte Entwicklungen von Panzerabwehrgeschützen wurden durch das Auftreten schwererer und stärker gepanzerter Kampfwagen schnell überholt; fortwährende Leistungssteigerungen der Geschütze wie auch der Panzermunition waren die Folge. Die Möglichkeiten, den Panzerschutz weiter zu erhöhen, finden ihre Grenzen in der Größe und der zu fordernden Beweglichkeit der Fahrzeuge.

Dennoch zeichnen sich neue Wege ab, den ballistischen Schutz der Panzerungen gegen panzerbrechende Geschosse zu erhöhen. Flachere Neigungswinkel der Panzerungen und Verbesserung ihrer spezifischen Qualität sowie neuartige Schotten- und Sonderpanzerungen führen zu einer Wirkungsminderung selbst bei der modernsten Munition.

Die vorgenannte Entwicklung, also der Wettlauf zwischen Waffe und Abwehr, geht deutlich aus der Tabelle 1107 hervor, in der die Daten einiger Panzerabwehrkanonen aus dem Zweiten Weltkrieg einander gegenübergestellt sind. Die Zahlen 35, 38 usw. bei den Geschützbezeichnungen geben ungefähr das Entwicklungsjahr an.

Die zur Zeit eingeführten Panzerkanonen verschießen mit einer Ausnahme (englischer Panzer „Chieftain" mit 120-mm-Kanone) ausschließlich patronierte Munition aus gezogenen Rohren, d.h. die Geschosse sind vorwiegend drallstabilisiert oder sie besitzen als flügelstabilisierte Version ein durchrutschendes Führungsband[1]). Die Treibladungshülsen sind noch aus Metall, vorwiegend Messing; bei Neuentwicklungen sollen sie jedoch durch verbrennbare Hülsen ersetzt werden.

Tabelle 1107. *Panzerabwehrkanonen aus dem Zweiten Weltkrieg.*

Geschütz	Geschützgewicht	Rohrlänge	Mündungsgeschw. v_0	Geschoßgewicht	Mündungswucht E_0	Durchschl.-leistung[1)]
			der verwendeten Panzergranate			
	kg	Kal.	m/s	kg	Nm	mm
3,7 cm Pak 35	450	L/45	762	0,685	190	16
3,7 cm Pak K	1314	L/65	885	0,685	270	23
4,7 cm Pak 36 (t)	1860	L/43	775	1,65	500	39
5 cm Pak 38	1000	L/60	823	2,25	760	40
7,5 cm Pak 40	1425	L/46	770	6,8	2020	80
7,62 cm Pak 39	1550	L/42	770	6,8	2020	85
8,8 cm Pak 41/43	4380	L/71	1000	10,2	5100	150
12,8 cm Pak 44	10160	L/55	920	28,3	11980	385

1) Durchschlagsleistung auf 1000 m Schußweite bei einem Auftreffwinkel (Winkel zwischen Plattennormale und Flugbahn) von 30°.

Die Tendenz, drallstabilisierte Geschosse in zunehmendem Maße durch flügelstabilisierte wegen der größeren Leistung der letzteren zu ersetzen, nimmt zu.

---

1) Vgl. 11.2.3.3.1, Flügelstabilisierte Hohlladungsgeschosse.

Die Kaliber der heutigen Panzerbord- und Panzerabwehrkanonen einschl. Neuentwicklungen liegen im Bereich von 76 bis 152 mm. In der Entwicklung zu immer größeren wirkungsvolleren Kalibern scheint hiermit die sinnvolle, obere Grenze erreicht zu sein, und zwar aus folgenden Gesichtspunkten:

Die Begrenzung der Sichtweiten durch die natürlichen Geländeverhältnisse ergibt bestimmte Entfernungen, bis zu denen Panzerabwehrgefechte möglich sind. So sind beispielsweise für den europäischen Raum nur wenige Panzergefechte auf größeren Entfernungen als 2000 bis 2500 m zu erwarten. Bis zu diesen Hauptkampfentfernungen haben die von Rheinmetall entwickelten Panzerbordkanonen letzten Entwicklungsstandes ausreichende Durchschlagsleistung, um moderne Panzer der bekannten Grundausstattung an den meisten Stellen zu durchschlagen.

Eine wichtige Aufgabe in der Entwicklung der panzerbrechenden Munition wird darin gesehen, die Treffgenauigkeit zu steigern. Um eine grobe Vorstellung heute erreichbarer Leistungen auf großen Entfernungen aufzuzeigen, sei als Beispiel genannt, daß eine Standardabweichung der Ablagen der einzelnen Schüsse um den mittleren Treffpunkt nach Höhe und Seite von 0,2 bis 0,3 Strich innerhalb des Bereichs der gestellten Forderungen liegt. Das bedeutet, daß auf 2000 m Entfernung rund zwei Drittel aller Schüsse innerhalb eines Quadrates von 1,0 bis 1,6 m Kantenlänge liegen.

Eine weitere Aufgabe dieser Entwicklung besteht darin, die Durchschlagsleistungen gegenüber den bereits erwähnten Problemen, nämlich Panzerstähle hoher Güte, flache Auftreffwinkel und Schottenpanzerung, zu verbessern.

In letzter Zeit ist der Panzerabwehr-Hubschrauber (siehe Seite XXIX, Bild 12) in zunehmendem Maße zu einer Bedrohung für den Panzer geworden. Abwehr und Bekämpfung dieses Kampfmittels sind gleichermaßen Angelegenheit der Panzerung und der Panzermunition.

Die wichtigsten Geschoßarten sind Wuchtgeschosse, meist kalibergleiche oder unterkalibrige Hartkern- und Schwermetallgeschosse (Bilder 1105, 1108 und 1109) sowie Hohlladungsgeschosse (Bilder 1110a bis d), aber auch noch Quetschkopfgeschosse (Bild 1113) und Panzervoll- und Panzersprenggeschosse (Bilder 1104 und 1106).

Bei den Wuchtgeschossen liegt das unterkalibrige, flügelstabilisierte KE-Geschoß APDSFS (Bild 1109) in der Leistung deutlich über der sonstigen Wuchtmunition und findet damit zunehmend Verwendung für neue Panzerkanonen.

Die Beurteilung verschiedener Panzergeschosse ist infolge der Vielzahl der zu berücksichtigenden Faktoren äußerst schwierig. Der wichtigste Faktor ist letztlich die Vernichtungswahrscheinlichkeit (kill probability). Diese ergibt sich aus der Treffaussicht und der Wirkung im Ziel.

In den Bildern 1128 bis 1130 sind für die nachstehenden Geschoßarten einige wesentliche Faktoren aufgezeigt, und zwar für ein

Panzervollgeschoß	(AP, armor piercing, panzerbrechend), v_0 = 900 m/s,
Hartkerngeschoß	(HVAP, hyper velocity armor piercing, Hochgeschwindigkeits-Hartkerngeschoß, panzerbrechend), v_0 = 1150 m/s,
Treibkäfig-Hartkerngeschoß,	drallstabilisiert (APDS, armor piercing discarding sabot, panzerbrechendes Treibkäfiggeschoß), v_0 = 1450 m/s,
Hohlladungsgeschoß,	flügelstabilisiert (HEAT, high explosive antitank, hochexplosives Panzergeschoß), v_0 = 1200 m/s,
Quetschkopfgeschoß	(HEP, high explosive plastic, hochexplosives Quetschkopfgeschoß), v_0 = 800 m/s.

In Bild 1128 ist die auf das Rohrkaliber bezogene Panzerdurchschlagsleistung der vorgenannten Geschosse[1] in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel (Plattenneigung) bei einer Schußentfernung von 1000 m dargestellt. Man erkennt darin die Überlegenheit des Hohlladungsgeschosses HEAT; seine Wirkung hinter der Panzerung ist jedoch im allgemeinen geringer als bei anderen Panzergeschossen.

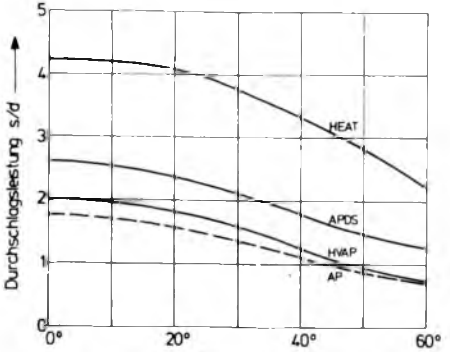


Bild 1128. *Durchschlagsleistungen s/d (s = Plattenstärke, d = Kaliber) der Panzergeschosse AP, HVAP, APDS und HEAT auf Einzelplatten in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel (Plattenneigung) bei 1000 m Schußentfernung.*

---

1) Das Quetschkopfgeschoß HEP ist wegen seiner speziellen Wirkungsweise hier nicht mitverglichen.

Bild 1129 zeigt die verschiedenen Flugbahnen der vorgenannten Geschoßarten und deren Flugzeit für eine Schußweite von 2000 m. Aus der gleichzeitig eingetragenen Zielhöhe (Annahme: durchschnittliche Zielhöhe eines Panzers = 2,3 m) ist ersichtlich, welchen Einfluß ein Entfernungsschätzfehler auf die Treffwahrscheinlichkeit der einzelnen Geschosse ausübt (bestrichener Raum[1]). So führt ein APDS-Geschoß infolge seiner rasanten Flugbahn schon zu einem Treffer, wenn sich das Zielobjekt noch rund 600 m vor der geschätzten Entfernung von 2000 m befindet. Beim wesentlich langsameren Quetschkopfgeschoß HEP darf der Schätzfehler dagegen nur einige Meter betragen.

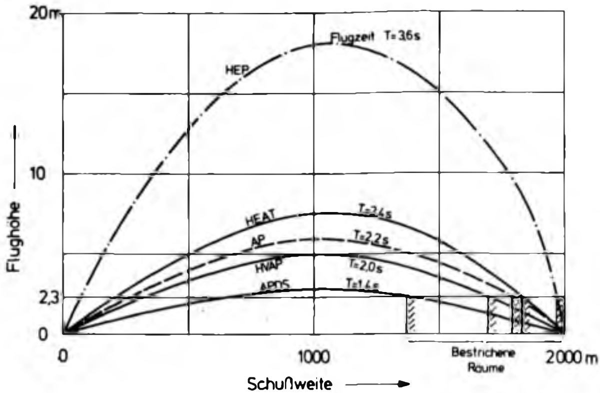


Bild 1129. *Flugbahnen und Flugzeiten T der Panzergeschosse AP, HVAP, APDS, HEAT und HEP bei 2000 m Schußweite.*

Die Geschoßstreuung hängt in starkem Maße gleichfalls von der Flugzeit ab, so daß neben dem aus Bild 1129 ersichtlichen geringer bestrichenen Raum auch eine größere Geschoßstreuung auftritt und die Treffaussichten somit weiter verringert werden.

Bild 1130 zeigt schließlich den Einfluß des Seitenwindes auf die Treffgenauigkeit verschiedener Geschoßarten. Da der Flugzeitunterschied bei den Geschossen HVAP, AP und HEAT bei einer Schußentfernung von 2000 m nicht sehr groß ist, werden für diesen Vergleich nur die Geschosse APDS, HEAT und HEP betrachtet. Angenommen ist ein Seitenwind von 10 m/s. Man erkennt, daß die Trefferablage Δz des mit geringer v_0 verschossenen Geschosses HEP sowie des aerodynamisch ungünstigen HL-Geschosses HEAT verhältnismäßig groß ist und deren Treffgenauigkeit somit stark beeinträchtigt wird.

---

1) Vgl. 3.1.4, Der bestrichene Raum.

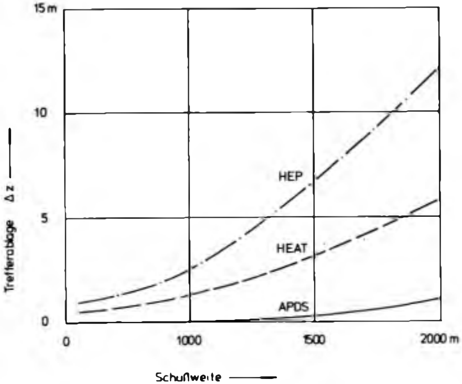


Bild 1130. *Trefferablage Δz der drei Panzergeschosse APDS, HEAT und HEP bei Seitenwind von 10 m/s in Abhängigkeit von der Schußweite.*

Neben ihrer panzerbrechenden Wirkung besitzen das Hohlladungsgeschoß HEAT und insbesondere das Quetschkopfgeschoß HEP eine erhebliche Spreng- und Splitterwirkung gegen sogenannte weiche Ziele.

Die Entwicklung für zukünftige Panzermunition zeigt eine deutliche Tendenz zu flügelstabilisierten Geschossen in Verbindung mit glatten Rohren. Als Wuchtgeschoß wird dabei das unterkalibrige Treibring-KE-Geschoß nach Bild 1109 vorwiegend eingesetzt werden, von dem neben rasanter Flugbahn und großer Treffgenauigkeit auch eine große Durchschlagsleistung gegen Einfach- und Schottenpanzerung zu erwarten ist.

Parallel dazu läuft die Entwicklung eines ebenfalls flügelstabilisierten HL-Geschosses, das auch als Sprenggeschoß mit großer Splitterwirkung eingesetzt werden kann (Mehrzweckgeschoß). Auch hierbei wird auf große Durchschlagswirkung bei Schottenpanzerung Wert gelegt.

11.4.3.1. Das Durchschlagsverhalten von Panzergeschossen

Das Durchschlagsverhalten panzerbrechender Geschosse hängt von vielen Faktoren ab: Neben der Auftreffgeschwindigkeit des Geschosses, seinem Kaliber, seiner Masse und seinem konstruktiven Aufbau sind der Auftreffwinkel und die Materialeigenschaften sowie die Dicke der Panzerung die entscheidenden Parameter.

Der eigentliche Durchdringungsvorgang kann auf verschiedene Weise erfolgen:

Durch *Drücken* entsteht ein Bruch der Platte unter Rißbildung infolge zu großer Dehnung.

Durch *Dornen* wird das Material durch die Geschoßspitze zum seitlichen Ausweichen gezwungen. Trifft ein Geschoß mit hoher Geschwindigkeit auf eine Panzerung, so treten an der Geschoßspitze so große Druckkräfte auf, daß das Material plastifiziert wird und ausweicht.

Durch *Stanzen* drückt das Geschoß einen kalibergroßen Pfropfen aus der Platte heraus. Bei sehr harten und spröden Platten bricht das verdrängte Material an der Rückseite in Form von Scheiben oder Fragmenten aus.

Der wirkliche Durchdringungsvorgang ist meist eine Kombination der Einzelvorgänge und hängt von den eingangs beschriebenen Faktoren, speziell der Auftreffgeschwindigkeit, dem Auftreffwinkel und der Plattendicke ab.

So ist z.B. die Auslegung der Geschoßspitze ein wesentliches Kriterium für das erreichbare Panzerdurchschlagsvermögen eines Geschosses. Eine stumpfe Ausführung ist bei flachen Auftreffwinkeln (starke Plattenneigung) überlegen, da sie weniger zum Abgleiten neigt, sich beim Eindringen in der Richtung der Plattennormalen aufstellt und somit den kürzesten Weg durch die Panzerung sucht. Eine schlanke Geschoßspitze ist bei senkrechtem Auftreffen vorteilhafter, weil dadurch das Ausweichen des Zielmaterials gefördert wird.

Es sind eine ganze Reihe verschiedener Ansätze bekannt, die experimentellen Ergebnisse für die Durchschlagsleistung von Wuchtgeschossen in Abhängigkeit von den Einflußgrößen in einer Formel darzustellen, um eine rechnerische Vorhersage zu ermöglichen. Wegen der Komplexität des Vorgangs ist das aber nur annäherungsweise möglich. In der Praxis hat sich die Panzerformel des französischen Marineingenieurs DE MARRE recht gut bewährt, die im Prinzip davon ausgeht, daß die Durchdringungsarbeit eines Geschosses seiner Auftreffenergie gleichgesetzt wird.

Bei vorgegebenen Größen für Auftreffgeschwindigkeit, Gewicht und Durchmesser eines Geschosses ist die gerade noch zu durchdringende Panzerungsstärke s (in dm):

$$s = \sqrt[0{,}7]{\frac{m_G^{0{,}5} \cdot v_Z}{A \cdot d^{0{,}75}}} \cdot$$

Hierin bedeuten

- m_G das Geschoßgewicht in kg,
- v_z die Auftreffgeschwindigkeit in m/s,
- d das Geschoßkaliber in dm,
- A einen empirischen Faktor, der den Geschoßaufbau und die Eigenschaften des Panzerwerkstoffs berücksichtigt. Anhaltswerte sind A = 2000 bis 2500 für Panzervollgeschosse und A = 1400 bis 1800 für Hartkerngeschosse.

Weicht die Auftreffrichtung des Geschosses von der Plattennormalen um den Winkel α ab, so nimmt der erreichbare Panzerdurchschlag stärker ab als es dem theoretischen Geschoßweg durch die Platte entspricht; die durchschlagbare Plattenstärke s wird um den Faktor $\cos^n \alpha$ (mit $n > 1$) geringer.Die Praxis zeigt, daß sich mit n = 1,5 eine weitgehende Übereinstimmung mit den wirklichen Verhältnissen erzielen läßt.

Grundsätzlich setzen diese wie alle anderen Panzerformeln gleiche Geschoßausführungen bezüglich Konstruktion, Ausbildung der Geschoßspitze und Material sowie gleiche Eigenschaften der Panzerplatten voraus. Sie sind deshalb nur zur Abschätzung der erreichbaren Panzerdurchschlagsleistung geeignet.

11.4.4. Artilleriemunition

Aufgabe der Artillerie ist die Bekämpfung sowohl naher als auch entfernter Punkt- und Flächenziele im direkten oder indirekten Beschuß.

Außerdem wird oft für einen möglichst großen Entfernungsbereich ein bestimmter Mindestfallwinkel (etwa 30° bis 45°) gefordert. Beides ist nur möglich, wenn die Geschosse mit verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten verschossen werden können. Die Artillerie verwendet deshalb keine patronierte, sondern „getrennte Munition"; die Treibladungen sind in verschiedene Gewichtsgruppen, die sogenannten Ladungen unterteilt.

Sowohl von der Munitions- als auch von der Waffenseite her unterscheidet man zwischen Hinterladern und Vorderladern. Hinterlader sind die Haubitzen und Kanonen, Vorderlader sind die Granatwerfer, häufig auch Mörser genannt. Werfer sind fast ausschließlich für Steilfeuerbahnen (Abschußwinkel $> 45°$), Kanonen meist für rasante Flugbahnen (Abschußwinkel $< 50°$) und große Schußweiten bestimmt. Haubitzen sind in der Lage, sowohl im oberen wie unteren Winkelbereich zu schießen.

Aus den Hinterladern werden meist drallstabilisierte, aus den Vorderladern meist flügelstabilisierte Geschosse verschossen.

11.4.4.1. Munition für Kanonen und Haubitzen

Grundsätzlich kann heute kaum mehr zwischen Kanonenmunition und Haubitzenmunition unterschieden werden. Früher waren die Unterschiede zwischen Haubitzen und Kanonen noch sehr deutlich; Kanonen hatten eine wesentlich größere Abschußleistung als Haubitzen, um große Reichweiten erzielen zu können. Die Geschosse für Kanonen waren deshalb wegen der größeren Abschußbeanspruchung im allgemeinen dickwandiger und äußerlich schon durch das breitere Führungsband von Haubitzengeschossen zu unterscheiden. Die augenblickliche Entwicklung zeigt jedoch, daß derartige Unterschiede im Zuge der Standardisierung und Rationalisierung der Logistik immer mehr verschwinden. Man spricht bei einigen Neuentwicklungen bereits von „Kanonenhaubitzen".

Am Beispiel von zwei älteren Geräten, die z.Z. noch bei der deutschen Bundeswehr eingeführt sind, werden die Unterschiede zwischen Kanonen und Haubitzen gezeigt (Tabelle 1108).

Tabelle 1108. *Vergleich der 155-mm-Feldhaubitze und der 155-mm-Feldkanone.*

		155-mm-Feld-haubitze	155-mm-Feld-kanone
Rohrlänge (gezogener Teil)	mm	2905	5882
Rohrlänge (gezogener Teil)	Kal.	18,7	38
Inhalt des Verbrennungsraumes	dm^3	13	26,6
Max. Gasdruck	bar	2250	2800
Max. Mündungsgeschwindigkeit	m/s	564	853
Mündungsenergie	kNm	6840	15640
Max. Schußweite	m	14600	23100
Sprenggeschoß, Bezeichnung		M 107	M 101
Geschoßgewicht	kg	43	43
Breite des Führungsbandes	mm	25,9	51,3
Breite des Führungsbandes	Kal.	0,167	0,331
Zahl der Ladungen		7	2
Mündungsgeschwindigkeit bei der kleinsten Ladung	m/s	207	640
Kürzeste Schußweite in der oberen Winkelgruppe bei kleinster Ladung	m	2900	13000

Bild 1131 zeigt die maximalen Schußweiten der beiden Geschütze sowie die Schußweitenbereiche der einzelnen Ladungen. Zum Vergleich wurde

für beide Waffen ein Schießen in der oberen Winkelgruppe, d.h. bei Erhöhungen über 45° vorausgesetzt. Die kleinen Ladungen (1. bis 4.) der Feldhaubitze überdecken sich hierbei um jeweils 200 m, die nächstgrößeren Ladungen (4. bis 6.) um jeweils 300 m und die 6. und 7. Ladung um 400 m. Bei der Feldkanone wird auf eine Überdeckung verzichtet.

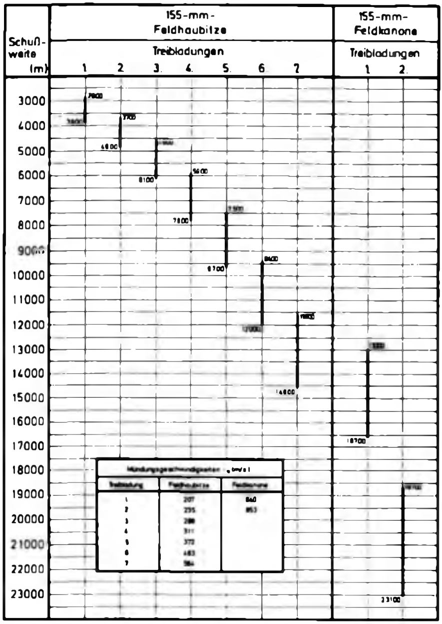


Bild 1131. ***Schußweiten und Schußweitenbereiche der 155-mm-Feldhaubitze und der 155-mm-Feldkanone.***

Die *Treibladung* ist, wie schon erwähnt, in einzelne Ladungen unterteilt. Das Pulver jeder einzelnen Ladung ist in einem Beutel aus Kunstseidengewebe, der mit der Ladungsnummer versehen ist, untergebracht. Bei Haubitzen mit stark unterteiltem Ladungsaufbau sind Pulver mit verschiedenen Abbrandcharakteristiken erforderlich: die unteren Ladungen haben wegen der geringen Ladedichte ein dünnwandiges („scharfes") Pulver (hohe Abbrandgeschwindigkeit), die oberen Ladungen haben ein dickwandiges („faules") Pulver (niedrige Abbrandgeschwindigkeit). Bei Kanonen mit wenig unterteiltem Ladungsaufbau wird für die einzelnen Ladungen gleiches Pulver verwandt.

Mittelkalibrige Artilleriemunition – etwa bis zum Kaliber 120 mm – verwendet noch Treibladungshülsen aus Stahl oder Messing. Diese enthalten das Anfeuerungselement, den Treibladungsanzünder oder den „Primer", und dienen als Behälter für die Ladung sowohl beim Transport als auch beim Laden und beim Schuß selbst. Das Geschoß ist aber nicht wie bei der patronierten Munition fest mit der Hülse verbunden, sondern wird, nachdem die gewünschte Ladung hergerichtet ist, nur lose auf die Hülse aufgesteckt und dann mit dieser gemeinsam geladen. Man spricht daher von „Aufsteckmunition".

Bei großkalibrigen Artilleriewaffen, etwa vom Kaliber 155 mm an, ist „getrennte Munition" üblich. Die Treibladungen werden in einem Behälter transportiert, der nur Transportbehälter ist. Das Geschoß wird zunächst allein geladen; es muß dabei so fest in den Ladungsraum geschoben (angesetzt) werden, daß es auch bei größter Rohrerhöhung nicht zurückrutscht. Anschließend wird die Treibladung geladen, der Verschluß geschlossen und dann das Anfeuerungselement, der Treibladungsanzünder (häufig als „Primer" bezeichnet), in den Verschluß gebracht.

Bild 1132 zeigt eine vollständige Schußeinheit für getrennte Munition. Dazu gehören der Treibladungsbehälter, die zusammengebundene Treibladung, das Geschoß mit Ösenschraube (für den Transport), der Kopfzünder, der Booster und der Primer. Beim Herrichten des Geschosses für den Schuß wird die Ösenschraube abgeschraubt, der Booster (die Ver-

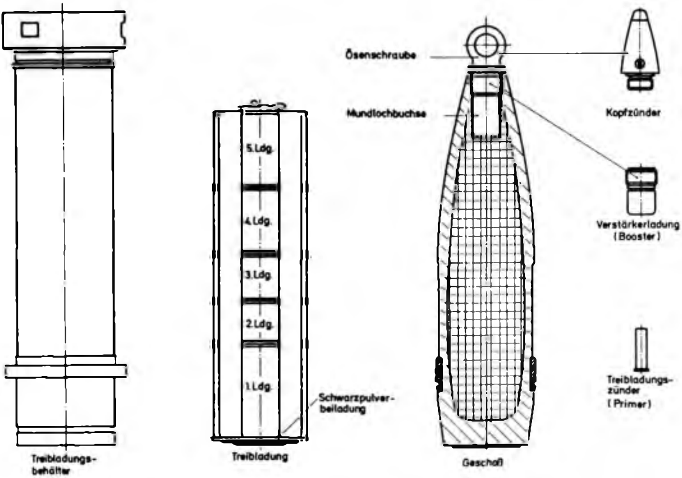


Bild 1132. *Vollständige Schußeinheit für getrennte Munition.*

stärkerladung) in die Mundlochbuchse gelegt und dann der Zünder aufgeschraubt. Zuweilen sind Kopfzünder und Booster schon beim Transport zusammengeschraubt.

Die Artillerie verschießt im wesentlichen Sprenggeschosse, daneben eine große Zahl von Sondergeschossen. Die Sprenggeschosse besitzen normalerweise den unter 11.2.2 beschriebenen Aufbau, Sondergeschosse (Signal-, Nebel-, Leuchtgeschosse und Minenstreugeschosse) sind unter 11.2.8 beschrieben. Soweit wie möglich erhalten die Geschosse gleiche Außenformen und gleiches Gewicht, um eine einheitliche Schußtafel verwenden zu können.

Die Entwicklung moderner Artilleriemunition erstreckt sich einmal auf das Gebiet der Trägergeschosse (s. 11.2.7), zum anderen befaßt sie sich mit Versuchen zur Leistungssteigerung, d.h. Reichweitenverbesserung bestehender Waffensysteme durch Entwicklung nachbeschleunigter Geschosse (s. 11.2.6) oder geeigneter Pfeilgeschosse (s. 11,2.4).

11.4.5. Granatwerfermunition (Mörsermunition)

Granatwerfer oder Mörser sind Waffen einfachster Bauart mit kurzem, glattem Rohr. Die gebräuchlichen Kaliber liegen heute zwischen 40 und 120 mm. Werfer sind Vorderlader, d.h. die Munition (flügelstabilisierte Geschosse mit Treibladung) wird von der Rohrmündung her geladen. Sie schießen fast nur in der oberen Winkelgruppe, also mit Erhöhungen über 45°. Eine vollständige Schußeinheit ist in Bild 1133 dargestellt. Der Geschoßkörper hat die Form einer Spindel oder eines länglichen Ellipsoids, seltener eine tonnenähnliche Form. Auf dem dicksten Teil des Geschoßkörpers, dem Zentrierteil, eingedrehte Rillen dienen als Labyrinthdichtung gegen den Durchtritt der Pulvergase.

Das Leitwerk hat sechs bis zwölf Stabilisierungsflächen; es ist vielfach aus einer Aluminiumlegierung stranggepreßt. Der hohle, ebenfalls aus Aluminium bestehende Leitwerkschaft enthält die Treibladungsanfeuerung und eine Grundladung, die auch als „Null-Ladung" bezeichnet wird. Diese entzündet beim Abschuß durch radiale Bohrungen im Leitwerkschaft hindurch die weiteren Ladungen, die als geschlitzte Ringe um den Leitwerkschaft gelegt oder als Beutel zwischen die Leitflächen gehängt werden.

Die ballistische Leistung der Werfermunition ist vergleichsweise gering, da für den taktischen Einsatz dieser Waffenart ein geringes Gerätegewicht angestrebt wird.

Ähnlich wie bei der drallstabilisierten Munition für Kanonen und Haubitzen kommen Sprenggeschosse, Leucht- und Nebelgeschosse sowie weitere Sondergeschosse zur Verwendung. Panzerbrechende Geschosse hingegen werden von Mörsern nicht verschossen, da die Waffen wegen der verhältnismäßig großen Streuung und der langen Flugzeiten infolge

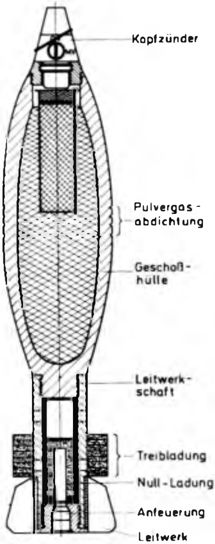


Bild 1133. *Granatwerfergeschoß, vollständige Schußeinheit.*

des Schießens in der oberen Winkelgruppe nicht für den Direktschuß geeignet sind. Trotzdem stellen die Granatwerfer eine sehr wirkungsvolle und leistungsstarke Waffe dar, vor allem im Hinblick auf den geringen Geräteaufwand; ihre Hauptvorteile sind die große Beweglichkeit infolge des geringen Waffengewichts und die Eignung zur Bekämpfung von Zielen hinter Deckungen auf kürzeste Entfernung.

11.4.6. Übungsmunition

Die mit dem Sammelbegriff *Übungsmunition* bezeichnete Munition, die es in einer Vielzahl von Ausführungsformen für nahezu alle Schußwaffen gibt, dient, wie der Name sagt, zum Üben sowohl mit der Munition selbst als auch mit dem betreffenden Gerät. Ihr Zweck ist grundsätzlich die Ersparnis von Kosten gegenüber der entsprechenden Gefechtsmunition sowie eine Schonung des Geräts. Darüber hinaus wird sie für Funktions- und Abnahmeprüfungen der Geräte verwandt.

Dementsprechend unterscheidet man Munition zur Darstellung gefechtsähnlicher Bedingungen, auch *Manövermunition* genannt, und sog. „Üb"- und „blinde" Munition, auch *Exerzier-* und *Zielübungsmunition* genannt, zum Üben von Handgriffen an der Waffe wie Laden, Ent-

laden, Richten usw. Exerziermunition enthält in der Regel keine brennbaren Teile, also weder Pulver noch Zündhütchen.

Prüfpatronen, die zu Haltbarkeitsprüfungen der Waffe dienen, haben eine verstärkte oder besonders zusammengesetzte Treibladung zur Erzielung eines gegenüber dem normalen Gasdruck erhöhten Gasdrucks.

Die hohen Sicherheitsanforderungen an alle Arten von Übungsmunition setzen einen kleinen und genau überschaubaren Gefahrenbereich voraus; insbesondere bei Manövermunition ist der Vermeidung der Gefährdung von Mannschaft und Gerät größte Beachtung zu schenken.

11.4.6.1. **Manövermunition**

Bei Manövern oder ähnlichen taktischen Gefechtsausbildungen soll die Manövermunition gefechtsähnliche Vorgänge wie Abschußknall, Mündungsfeuer und -rauch, auch Leucht- und Knallerscheinungen bei Granateinschlägen simulieren.

Die bekannteste und älteste Manövermunition ist die meist bei Handfeuerwaffen verwendete *Platzpatrone*. Ihre patronenähnlich geformte Messing- oder Plastikhülse enthält eine Treibladung, die so bemessen ist, daß der Mündungsknall sowie Licht- und Raucherscheinungen einem normalen Schuß entsprechen. Beim Schuß reißt eine Verdämmung auf, die die entwickelten Gase freigibt, ohne daß harte Teile den Lauf verlassen. Bei automatischen Waffen läßt sich darüber hinaus auch die Waffenfunktion darstellen, wozu allerdings Zusatzgeräte wie Rückstoßverstärker benötigt werden.

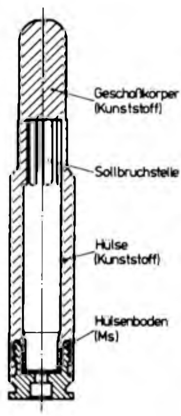


Bild 1134. *Plastik-Trainingspatrone.*

Eine neuere Entwicklung ist die Plastik-Trainingspatrone (PT-Patrone), Bild 1134. Die Kunststoffhülse mit Metallboden und Zündhütchen ist mit einem Kunststoff-Geschoßkörper über eine Sollbruchstelle verbunden, die beim Schuß reißt und das „Geschoß" freigibt. Dieses verliert wegen seiner kleinen Masse sehr schnell an Energie und erfordert deshalb nur einen begrenzten Sicherheitsbereich.

Die PT-Munition wird ebenfalls hauptsächlich bei Handfeuerwaffen, aber auch bei automatischen Kanonen verwandt; da sie jedoch nur geringe Abschußimpulse erzeugt, bedarf es bei den letzteren auch bestimmter Zusatzgeräte (Rückstoßverstärker), um die Funktionssicherheit der Waffe zu gewährleisten.

Zur Manövermunition für Maschinenkanonen gehört das *Zerfallgeschoß* (Bild 1135), das mit normalen Treibladungen (Patronenhülsen) verschossen wird. Es besteht aus einer Kunststoffhülle mit einer Füllung aus gepreßtem Eisenpulver und besitzt genau das Gewicht eines entsprechenden normalen Geschosses. Sofort nach Verlassen des Rohres reißt die Hülle infolge der Fliehkräfte auf, und die Füllung zerstäubt. Obwohl mit der gleichen Anfangsgeschwindigkeit wie das Gefechtsgeschoß verschossen — bei gleichen Patronenabmessungen und -gewichten gewährleistet das eine einwandfreie Waffenfunktion —, besitzen die Geschoßteile (Hülle, Boden und Füllung) je nach Kaliber in 50 bis 100 m Entfernung vor der Mündung keine schädliche Wirkung mehr.

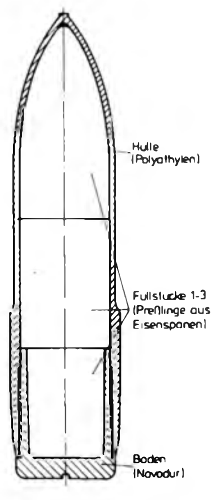


Bild 1135. *Zerfallgeschoß.*

Als Manövermunition für größere Kaliber zur Darstellung der den Abschuß begleitenden Knall-, Licht- und Rauchentwicklung sind im wesentlichen zwei Arten bekannt, und zwar die aus Abschußbechern zu verschießende sog. *Knalldarstellungsmunition* und die für normale Waffenrohre bestimmte *Manöverkartusche.* Bei der erstgenannten wird ein in einem Kunststofftopf zwischen Verdämmungen (Gummimehl und Styropor) festgelegter Knallsatz aus meist oberhalb des Waffenrohres angebrachten Abschußbechern elektrisch gezündet; er erzeugt dabei die der normalen Munition oder deren Teilladungen ähnlichen Abschußerscheinungen, nämlich Knall, Rauch und Mündungsfeuer. Der Vorteil besteht darin, daß Rohr und Waffe bei der Übung nicht beansprucht werden. Allerdings ist dabei der übliche Ladevorgang nicht zu üben.

Die *Manöverkartusche,* wie sie z.B. für das Kaliber 155 mm als Styroporhülle mit einer durch Gummimehlverdämmung festgelegten Pulverladung entwickelt wurde, wird genau wie eine normale Treibladung geladen und abgefeuert. Sie hat den Vorteil, daß mit ihr der übliche Lade- und Abschußvorgang gleichzeitig exerziert werden kann; nachteilig ist, daß Rückstände im Rohr bleiben, die eine Verschmutzung hervorrufen können.

Blitz-. Leucht- und Knalleffekte sowie andere Erscheinungen, die bei der Detonation von Granaten und Bomben *im Ziel* auftreten, werden durch bestimmte pyrotechnische Sätze erzeugt bzw. simuliert[1]. Diese Art von Darstellungsmunition wird aus Abschußbechern, die gleichzeitig als Transportbehälter dienen, verschossen und im angenommenen Zielgebiet elektrisch oder pyrotechnisch mit Verzögerung gezündet.

11.4.6.2. **Exerziermunition**

Die mit der Bezeichnung „Üb" gekennzeichnete Exerziermunition, auch *Zielübungs-* und *Abnahmemunition* genannt, ist in Form, Abmessung und Gewicht im wesentlichen der entsprechenden Gefechtsmunition gleich. Die dient als „blinde" Exerziermunition, die weder Pulver noch Zündhütchen enthält, zur Ausbildung, d.h. zum Üben des Ladens und Entladens. Anstelle der Sprengladung — bei normalerweise der gleichen Geschoßhülle wie sie z.B. das entsprechende Sprenggeschoß besitzt — wird eine inerte Masse derselben Dichte eingepreßt oder eingegossen; bei kleineren Kalibern, z.B. 20 mm, verwendet man vielfach auch metallische Füllstücke. An die Stelle des Zünders tritt meist ein Zünderersatzstück.

Bei größeren Kalibern enthält das Übungsgeschoß oft eine geringe Sprengladung und einen Aufschlagzünder. Damit wird bezweckt, daß einmal der Aufschlagpunkt gut markiert wird (wichtig beim Schießen von Bodentreffbildern), zum anderen, daß dadurch eine zumindest teil-

1) Vgl. Explosivstoffe, 1.5.

weise Zerlegung des Geschosses erfolgt, die unkontrollierbare Abpraller und Querschläger verhindert. Ein 155-mm-Geschoß z.B. kann bei einem Auftreffwinkel von 15 bis 20° je nach der Entfernung als Abpraller mehr als 5 km taumelnd weiterfliegen, wobei die Flugrichtung nach dem Abprall nicht vorherzusagen ist.

Die Exerziermunition dient, wie bereits gesagt, zur Ausbildung an der Waffe, d.h. zum Üben des Ladens, Richtens und Treffens. Das Treffbildschießen setzt voraus, daß diese Munition exakt die gleiche Ballistik wie die Gefechtsmunition aufweist, so daß auch die gleichen Schußtafeln benutzt werden können.

Darüber hinaus wird die Übungsmunition auch für Funktions- und Abnahmeprüfungen der Geräte verwendet. Jede Waffe muß nach ihrer Fertigstellung oder einer Überholung eingehend im Beschuß getestet werden.

Lebensdauererprobungen von Waffenrohren und anderen Teilen wie Verschluß und Zuführmechanismus bei automatischen Waffen erfordern naturgemäß eine sehr große Anzahl der entsprechenden Übungsgeschosse. So sind z.B. zum Lebensdauerbeschuß eines 20-mm-Rohres mehr als 8000 Schuß notwendig. Neben der gleichen Ballistik wird hier von der Üb-Munition gefordert, daß sie die gleiche Beanspruchung wie die Gefechtsmunition auf die zu untersuchenden Waffenteile ausübt; ferner soll sie wegen der notwendig hohen Stückzahlen im Preis möglichst billig sein.

11.4.7. Handgranaten und Abwurfmunition

Der Vollständigkeit halber seien als „Geschosse" die normalerweise nicht mit Treibladungen verschossenen Handgranaten und die Abwurfmunition (Fliegerbomben) erwähnt.

Handgranaten[1] sind „Sprenggeschosse"; sie bestehen aus dem Mantel, der Sprengladung und dem Zünder. Je nach der gewünschten Wirkung unterscheidet man in der Hauptsache Splitter-, Brand- und Nebelhandgranaten. Der meist einheitliche Zünder ist als „m.V."-Zünder (mit Verzögerung wirkend) oder als „o.V."-Zünder (ohne Verzögerung wirkend) ausgebildet[2].

---

1) Handgranaten sind bereits um 1400 von Konrad Kyeser in seinem Buch „Bellifortis" beschrieben. Die spätere Bezeichnung „grenade" hat einer ganzen Truppengattung, den Handgranatenwerfern oder Grenadieren, ihren Namen gegeben.

2) Vgl. Zünder, 13.2.3.

Fliegerbomben bestehen, wie die meisten Geschosse, ebenfalls aus der Geschoßhülle (dem Bombenkörper), der Ladung und ein oder mehreren Zündern. Die bekanntesten Arten sind Splitterbomben, Sprengbomben und Brandbomben, neuerdings auch Feuerbomben (z.B. Napalm) und Streubomben (mehrere Wirkteile).
Rheinmetall hat an der Entwicklung der Bombenwaffe schon früh (1930) teilgenommen. Als ihr besonderer Beitrag sind die Fertigung nahtloser Bombenhüllen nach dem Ehrhardtschen Preß- und Ziehverfahren und der Einsatz des im ehemaligen Rheinmetall-Werk Sömmerda erfundenen und entwickelten elektrischen Bombenzünders zu nennen.

11.5. Die Beanspruchung der Geschosse beim Abschuß

Da für einen Teil dieser Beanspruchungen, insbesondere der Beanspruchung der Führungsbänder, der Drall bzw. die Drallübertragung auf die Geschosse bestimmend ist, soll vorab einiges hierüber gesagt werden. Soweit diese Betrachtungen das Waffenrohr betreffen, berühren sie auch innenballistische Fragen[1].

11.5.1. Der Drall und die Führungsbänder

Drallstabilisierte Geschosse werden aus gezogenen Rohren verschossen. Die Geschosse erhalten zur Übertragung des Dralls ein oder – aus Beanspruchungs- und Verformungsgründen – teilweise auch mehrere, hintereinander angeordnete Führungsbänder.

Als *Züge* bezeichnet man die spiralförmig in die Rohrinnenwand eingearbeiteten Nuten. Die zwischen den Zügen verbleibenden Leisten werden als *Felder* bezeichnet. Neben den Nuten sind auch spiralförmig herausgearbeitete *Führungsflächen* bekannt, die dem Rohrquerschnitt innen annähernd die Form eines Vielecks geben (Polygon-Profil).

Die Felder schneiden sich beim Abschuß in die Führungsbänder des Geschosses ein und erzeugen bei dessen Durchgang durch den gezogenen Teil seine Drehbewegung, den *Drall.*

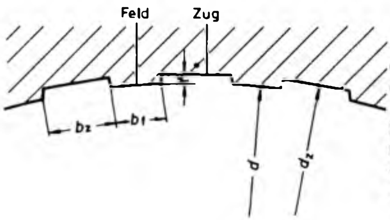
Bild 1136 stellt einen Ausschnitt aus dem Querschnitt durch ein gezogenes Rohr dar. Das *Kaliber* (der Nenndurchmesser) wird über den Feldern gemessen.

Eingeführt sind sowohl rechteckige als auch trapezförmige *Zugprofile.* Sie werden entweder spanlos (durch Hämmern über einen Dorn, vor allem bei kleinkalibrigen Rohren) oder spanabhebend (mit speziellen Ziehwerkzeugen) in die Rohrinnenwand eingearbeitet[2].

---

1) Vgl. Innere Ballistik, 2.1.1, Der Aufbau einer Rohrwaffe.

2) Vgl. 8.1.1.6, Fertigung der Rohre.



d = Kaliber
d_z = Durchmesser über den Zügen
b_z = Zugbreite
b_f = Feldbreite
t = Zugtiefe
(z = Zahl der Züge)

Bild 1136. *Querschnitt durch ein gezogenes Rohr (Ausschnitt); vgl. auch Bild 1139.*

Die *Zugbreite* ist wegen der geringeren Festigkeit des Führungsbandes und zum Zweck der leichteren Verquetschbarkeit stets größer als die Feldbreite. In der Regel ist $b_z \approx 1{,}4$ bis $2{,}0\ b_f$.

Die *Zahl der Züge* hängt außer vom Kaliber von der Beanspruchung sowohl der Führungsbänder als auch der Rohre ab; man rechnet mit einem Verhältnis von $z/d = 0{,}3$ bis $0{,}7\ \text{mm}^{-1}$ – wobei der kleinere Wert für die größeren Kaliber gilt –, und wählt meist eine durch 4 oder 6 teilbare Zahl.

Der Winkel, den die Züge mit einer zur Seelenachse parallelen Linie auf der Rohrinnenwand bilden, ist der *Drallwinkel* α (analog dem Steigungswinkel eines steilgängigen Gewindes). Den Drallwinkel zu Beginn der Züge nennt man den Anfangsdrall α_A, den an der Mündung den Enddrall α_E. Die Strecke, auf der das Geschoß (bei konstant angenommenen Drall) eine volle Umdrehung ausführt, bezeichnet man als *Dralllänge* D und gibt sie in Vielfachen des Kalibers d an. Zwischen Drallwinkel und Dralllänge besteht die Beziehung

$$\tan\alpha = \frac{\pi}{D} \quad \cdot \ (D \text{ in Kaliber})$$

In der Tabelle 1109 sind die Werte der Drallwinkel für Dralllängen von 12 bis 70 Kaliber angegeben.

Ist der Drallwinkel über der Führungslänge des Rohres gleichbleibend, so spricht man von konstantem Drall. Wählt man $\alpha_A < \alpha_E$ (der Drallwinkel nimmt zur Mündung hin zu), so ergibt sich ein zunehmender oder progressiver Drall.

Rechtsdrall nennt man den Drall, dessen Züge sich – zur Mündung hin gesehen – im Uhrzeigersinn winden, den gegensinnigen Verlauf entsprechend *Linksdrall.* Rechtsdrall bedingt infolge des Magnuseffektes eine Seitenabweichung der Geschosse auf ihrer Flugbahn nach rechts, Linksdrall eine solche nach links[1]. Um aus Gewöhnungsgründen immer

---

1) Vgl. Äußere Ballistik, 3.2.1, Aerodynamik des Geschosses, und 3.2.2.4, Störungsrechnung.

die gleiche Richtung der Seitenabweichung zu haben, fertigt man nahezu alle gezogenen Waffenrohre mit Rechtsdrall.

Die Festlegung des Drallwinkels und des Drallverlaufs (konstant oder progressiv) erfolgt nach den jeweiligen Erfordernissen; die wichtigsten sind ausreichende Flugstabilität der Geschosse, nicht zu hohe Beanspruchung der Rohre und der Führungsbänder sowie die mit dem Geschoßdrall zusammenhängenden Zünderfunktionen wie Vorrohrsicherheit und Selbstzerlegeeinrichtungen.

Die Beanspruchung eines Rohres hängt – außer von der Form und vom Werkstoff der Führungsbänder sowie von der guten Abdichtung zwischen Geschoß und Rohrinnenwand – wesentlich von der *Leistenkraft* ab. Darunter versteht man die Führungskraft, die tangential zwischen Rohrinnenwand und Geschoß auftritt und dieses in Drehung versetzt.

Da die Leistenkraft bei konstantem Drall dem Gasdruck proportional ist und der Gasdruckverlauf im allgemeinen ein ausgeprägtes Maximum hat, versucht man, die an der Stelle des Maximums auftretende Spitze der Leistenkraft durch Verwendung eines progressiven Dralls abzubauen. In Bild 1137 ist der Verlauf der Leistenkraft über dem Geschoßweg im Rohr für verschiedene Drallarten dargestellt.

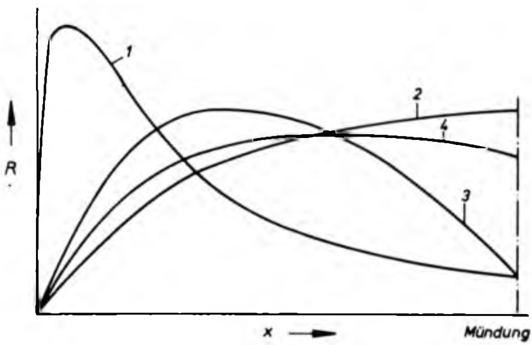


Bild 1137. *Verlauf der Leistenkraft R über dem Geschoßweg x im Rohr für verschiedene Drallarten;*
1 konstanter Drall, 2 parabolischer Drall, 3 sinusförmiger Drall, 4 kubisch-parabolischer Drall.

Der progressive Drall wird im allgemeinen sinusförmig, parabolisch oder kreisförmig ausgeführt, es sind jedoch auch andere Arten denkbar. Die meist verbreitete Drallart ist, nicht zuletzt aus Fertigungsgründen, auch heute noch der konstante Drall.

Tabelle 1109. *Drallwinkel* α *als Funktion der Dralllänge D.*

Dralllänge in Kal. D	Drallwinkel tan α	α	Dralllänge in Kal. D	Drallwinkel tan α	α
12	0,261799	14°40'14"	42	0,074799	4°16'40"
13	0,241661	13°34'22"	43	0,073060	4°10'43"
14	0,224399	12°38'51"	44	0,071399	4° 5' 2"
15	0,209440	11°49'45"	45	0,069813	3°59'37"
16	0,196350	11° 6'31"	46	0,068296	3°54'25"
17	0,184799	10°28'13"	47	0,066842	3°49'27"
18	0,174533	9°54'10"	48	0,065449	3°44'41"
19	0,165347	9°23'20"	49	0,064114	3°40' 6"
20	0,157080	8°55'38"	50	0,062832	3°35'43"
21	0,149599	8°30'30"	51	0,061599	3°31'30"
22	0,142799	8° 7'37"	52	0,060415	3°27'26"
23	0,136591	7°46'41"	53	0,059275	3°23'32"
24	0,130899	7°27'27"	54	0,058178	3°19'46"
25	0,125664	7° 9'45"	55	0,057120	3°16' 9"
26	0,120831	6°53'23"	56	0,056100	3°12'39"
27	0,116355	6°38'13"	57	0,055116	3° 9'17"
28	0,112199	6°24' 6"	58	0,054165	3° 6' 2"
29	0,108331	6°10'58"	59	0,053247	3° 2'53"
30	0,104720	5°58'42"	60	0,052360	2°59'50"
31	0,101342	5°47'12"	61	0,051502	2°56'54"
32	0,098175	5°36'25"	62	0,050671	2°54' 3"
33	0,095199	5°26'17"	63	0,049867	2°51'17"
34	0,092399	5°16'45"	64	0,049087	2°48'37"
35	0,089760	5° 7'45"	65	0,048332	2°46' 1"
36	0,087266	4°59'15"	66	0,047599	2°43'31"
37	0,084908	4°51'12"	67	0,046889	2°41' 5"
38	0,082674	4°43'34"	68	0,046199	2°38'43"
39	0,080554	4°36'20"	69	0,045530	2°36'25"
40	0,078540	4°29'27"	70	0,044879	2°34'11"
41	0,076624	4°22'54"			

Die *Führungsbänder* werden aus Kupfer, Kupferlegierungen, Weicheisen, Sintereisen oder Kunststoff gefertigt und meist in eine entsprechende Nut der Geschoßhülle eingepreßt und anschließend auf Fertig-

maß überdreht. Längsrillen im Nutboden verhindern ein Durchrutschen. Der Außendurchmesser der Bänder ist etwas größer als der Rohrdurchmesser d_z in den Zügen (s. Bild 1136); dadurch wird gewährleistet, daß nach dem Einschneiden bzw. Eindrücken in die Züge die Zugprofile voll ausgefüllt sind und die Führungsbänder gut gegen die Pulvergase abdichten. In den meisten Fällen genügt diese Abdichtung, bei Hochleistungsgeschossen kann eine zusätzliche Dichtung in Form eines Dichtringes aus elastischem oder plastischem Material wie Gummi oder Kunststoff hinzutreten.

Beim Abschuß eines Geschosses und bei seinem Durchgang durch das Rohr treten folgende Beanspruchungen auf:

Flächenpressung zwischen Führungsband und Zügen durch die Leistenkraft,

Tangentialschub zwischen Führungsband und Geschoßhülle,

Thermische Beanspruchung und Abrieb (Verschleiß) des Führungsbandes durch die Reibungsenergie,

Radiale Beanspruchung der unter dem Führungsband liegenden Geschoßhülle infolge der Verquetschung.

Bei der Dimensionierung von Führungsbändern und Zügen ist darauf zu achten, daß die drei erstgenannten Beanspruchungen aufgenommen werden können. Ferner können durch Auswahl der Werkstoffe hinsichtlich ihrer Gleiteigenschaften und der Warmfestigkeit auch bei hohen ballistischen Leistungen und hoher Kadenz die Reibungsarbeit möglichst klein gehalten und rohrschonende Bedingungen erzielt werden.

11.5.1.1. Die Leistenkraft

Verwendete Bezeichnungen (s. auch Bild 1138):

$P(x)$	= Gaskraft am Geschoßboden an der Stelle x des Rohres
$p(x)$	= Gasdruck an der Stelle x
d	= Kaliber
x	= Längsrichtung des Rohres
y	= abgewickelte Umfangsrichtung
$\alpha(x)$	= Drallwinkel an der Stelle x
$R(x)$	= Leistenkraft an der Stelle x
$\mu R(x)$	= Reibungskraft an der Stelle x

i	= Trägheitsradius des Geschosses im Rohr
J	= Geschoßträgheitsmoment um die Längsachse
l	= Geschoßweg im Rohr
ω	= Winkelgeschwindigkeit
v	= Geschoßgeschwindigkeit im Rohr
m_G	= Geschoßgewicht (-masse)

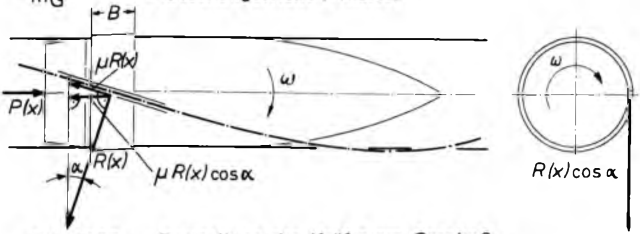


Bild 1138. *Darstellung der Kräfte am Geschoß.*

Unter Berücksichtigung der Züge zur Darstellung des wirksamen Rohrquerschnitts (z = Zahl der Züge, t = Zugtiefe, b_z = Zugbreite) ergibt sich die Gaskraft am Geschoßboden zu

$$P(x) = p(x) \cdot \left(\frac{\pi}{4} d^2 + z\,t\,b_z\right).$$

Das Kräftegleichgewicht in x-Richtung ergibt:

$$P(x) - R(x)\,[\sin\alpha(x) + \mu \cdot \cos\alpha(x)] - m_G \frac{dv}{dt} = 0. \qquad (1)$$

Das Momentengleichgewicht um die x-Achse liefert:

$$R(x)\,[\cos\alpha(x) - \mu \cdot \sin\alpha(x)]\,\frac{d}{2} - J\frac{d\omega}{dt} = 0. \qquad (2)$$

Mit $\qquad \omega = \frac{2}{d} v \tan\alpha = \frac{2}{d} v \frac{dy}{dx}$

wird nach Umwandlung aus Gleichung (2):

$$R(x) = J\left(\frac{2}{d}\right)^2 \frac{\frac{dv}{dt}\frac{dy}{dx} + v^2 \frac{d^2y}{dx^2}}{\cos\alpha(x) - \mu\sin\alpha(x)}. \qquad (3)$$

Setzt man näherungsweise

$$\mu\sin\alpha(x) \approx 0,$$

$$\cos\alpha(x) \approx 1$$

und $\qquad P(x) \approx m_G \frac{dv}{dt}$,

so vereinfacht sich Gleichung (3) als Näherungsformel für die Leistenkraft zu

$$R(x) \approx \frac{4\,J}{d^2\,m_G}\left[\frac{dy}{dx}\,P(x) + \frac{d^2y}{dx^2}\,v^2\,m_G\right]. \qquad (4)$$

Bei *konstantem Drall* mit der Drallkurve $y = \tan\alpha \cdot x$ wird

$$R(x) = \frac{4\,J}{d^2\,m_G}\tan\alpha\,P(x). \qquad (5)$$

Mit $J = m_G\,i^2$

ergibt sich die Leistenkraft zu

$$R(x) = \left(\frac{2i}{d}\right)^2 P(x)\tan\alpha = \left(\frac{2i}{d}\right)^2 P(x)\,\frac{\pi}{D}. \qquad (6)$$

(D = Drallänge in Kalibern)

Für Überschlagsrechnungen können mit guter Annäherung folgende Werte für $\frac{2i}{d}$ in die Gleichung (6) eingesetzt werden:

für ein übliches Sprenggeschoß	0,73,
für ein Minengeschoß	0,76,
für ein Panzersprenggeschoß	0,72,
für ein Hartkerngeschoß mit Treibspiegel	0,50 . . . 0,56.

Bei *parabolischem Drall* mit der Drallkurve $y = c_1 x + c_2 x^2$ wird die Gleichung der Leistenkraft

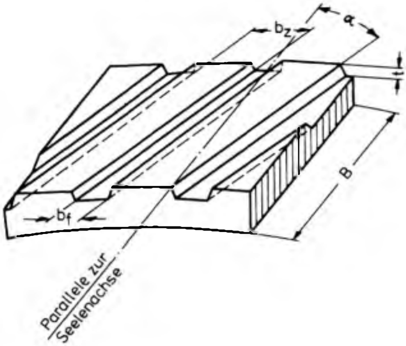
$$R(x) = \left(\frac{2i}{d}\right)^2 \left[P(x)\tan\alpha_A + (\tan\alpha_E - \tan\alpha_A)\,\frac{xP(x) + v^2\,m_G}{l}\right].$$

(α_A = Anfangsdrallwinkel, α_E = Enddrallwinkel).

11.5.1.2. Flächenpressung und Reibungsarbeit der Führungsbänder

Bild 1139 zeigt einen räumlich gezeichneten Führungsbandausschnitt mit der Definition der Abmessungen.

Bei der Dimensionierung der Züge und Führungsbänder ist von der durch die größte Leistenkraft R_{max} verursachten *Flächenpressung* an der Zugflanke auszugehen.



B = Führungsbandbreite
b_f = Feldbreite
b_z = Zugbreite
t = Zugtiefe
α = Drallwinkel

Bild 1139.
Führungsbandausschnitt.

Die Gesamtführungsfläche des oder der Führungsbänder ergibt sich zu

$$F = \frac{z\,t\,B}{\cos\alpha};$$

damit wird die maximale Flächenpressung

$$\sigma_{max} = \frac{R_{max}}{F} = \frac{R_{max}}{z\,t\,B}\cos\alpha$$

oder, da der Drallwinkel α im allgemeinen klein und damit $\cos\alpha \approx 1$ ist,

$$\sigma_{max} \approx \frac{R_{max}}{z\,t\,B}.$$

Anhaltswerte für zulässige Flächenpressungen von Führungsbandwerkstoffen sind für

Kupferlegierungen	σ	≈	150 ··· 200 N/mm²,
Sintereisen	σ	≈	200 ··· 300 N/mm²,
Kunststoff	σ	≈	100 ··· 200 N/mm².

Die *Reibungsarbeit* W der Führungsbänder ergibt sich aus

$$W = \int_0^1 R(x)\,\mu(x)\,d(x)$$

oder mit einem mittleren Reibungskoeffizienten μ_0 zwischen Führungsband- und Rohrwerkstoff

$$W = \mu_0 \int_0^1 R(x)\,d(x).$$

Bei konstantem Drall wird mit Gleichung (6) und

$$\int_0^1 P(x)\, d(x) = \frac{m^*}{2} v_0^2 \text{ (worin } m^* = m_G + 0{,}5\, m_L;$$

$$m_L = \text{Masse der Ladung):}$$

$$W = \mu_0 \left(\frac{2i}{d}\right)^2 \frac{m^*}{2} v_0^2 \tan \alpha .$$

Der mittlere Reibungswert μ_0 liegt zwischen 0,12 und 0,18.

11.5.1.3. Die Drehzahl der Geschosse

Die *Drehzahl* n eines Geschosses an einer beliebigen Stelle im Rohr ergibt sich zu

$$n = \frac{6000\, v}{\pi\, d} \tan \alpha \quad \text{oder} \quad n = \frac{6000\, v}{D\, d} \quad \text{(in U/min).}$$

Darin ist

- v die Geschoßgeschwindigkeit in m/s
- α der Drallwinkel
- D die Drallänge in Kalibern
- d das Kaliber in cm.

(v, α, D: an der betreffenden Stelle,)

Zur Bestimmung der Geschoßdrehzahl an der Rohrmündung ist für v die Mündungsgeschwindigkeit v_0, für α der Enddrallwinkel α_E und für D die Enddrallänge D_E zu setzen.

Die *Winkelgeschwindigkeit* (in s^{-1}) ergibt sich aus der jeweiligen minutlichen Drehzahl n zu

$$\omega = \frac{\pi\, n}{30} .$$

In Bild 1140 ist ein doppel-logarithmisches Netz gezeichnet, aus dem mit v, D und d die Drehzahl n abgelesen werden kann. Die Anwendung des Netzes ist an einem Beispiel erläutert:

Man lege durch das Kaliber d = 15,5 cm und die Drallänge D = 25 Kal. eine der schrägen Linien fest; an deren Schnittpunkt mit der Senkrechten bei v = 560 m/s ziehe man eine Waagerechte zur Drehzahlskala hin, wo der Wert n = 8700 U/min abgelesen werden kann.

11.5.2. Die Beanspruchung der Geschoßhüllen beim Abschuß

Die Dimensionierung und die Werkstoffauswahl in Verbindung mit der Festlegung des Fertigungsverfahrens für eine Geschoßhülle erfolgen

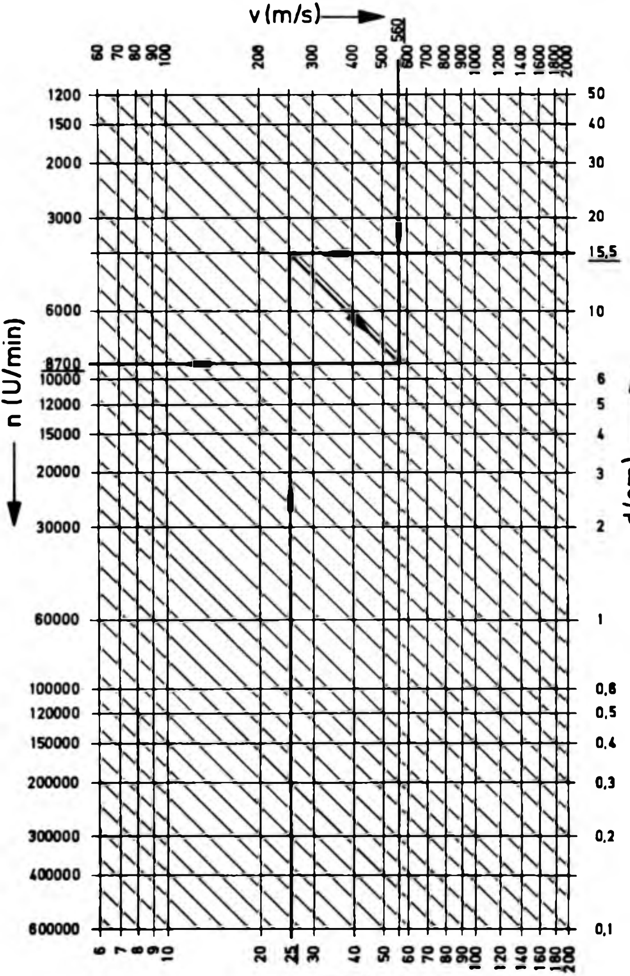


Bild 1140. *Netztafel zur Ermittlung der Geschoßdrehzahl n aus v, D und d.*

nach den beiden Gesichtspunkten „Haltbarkeit beim Abschuß" und „Wirkung im Ziel".

Die Haltbarkeit läßt sich rechnerisch erfassen. Die Wirkung im Ziel (Splitterbildung) muß durch Beschußversuche festgestellt werden.

Im folgenden wird eine Zusammenstellung der gebräuchlichsten Formeln, wie sie zur Berechnung einer Geschoßhülle verwendet werden, gegeben (s. auch Bild 1141).

Verwendete Bezeichnungen:

d	mm	Kaliber
d_1	mm	Unterkaliber
a_{max}	m/s^2	max. Geschoßbeschleunigung in Bewegungsrichtung (Reibung vernachlässigt)
v_0	m/s	Mündungsgeschwindigkeit des Geschosses
p_{max}	N/mm^2	größter auf den Geschoßboden wirkender Gasdruck
q	mm^2	Querschnitt des führenden Teils des Rohres = $\frac{\pi}{4} d^2 + z t b_z$; für gezogene Rohre mit üblichen Profilen ist $q \approx (0{,}805 \cdots 0{,}82)\ d^2$ [1]
m_G	kg	Geschoßgewicht im Rohr
u	–	Stelle, für die die Berechnung erfolgt
$m_V(u)$	kg	Gewicht aller vor dem Geschoßhüllenquerschnitt bis zu der Stelle (u) liegenden Geschoßteile, die sich auf den Querschnitt an der Stelle (u) abstützen
$\sigma(u)$	N/mm^2	Zug- oder Druckspannung (statisch) an der Stelle (u)
$f(u)$	mm^2	Fläche des Querschnitts an der Stelle (u)
α_E	(°)	Enddrallwinkel
ω	s^{-1}	Winkelgeschwindigkeit
v_r	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
σ_t	N/mm^2	Umfangs-(Tangential-) Spannungen in der Geschoßhülle
σ_r	N/mm^2	Spannungen in radialer Richtung
σ_x	N/mm^2	Spannungen in Längsrichtung
r	mm	Radius der Geschoßhülle

1) Der höhere Wert gilt für automatische Kanonen.

i	–	Index für „innen"
a	–	Index für „außen"
ρ	kg/mm^3	Dichte
sp	–	Index für „Sprengstoff"
H	–	Index für „Geschoßhülle"
p_{sp}	N/mm^2	durch Sprengstoff bewirkter hydrostatischer Druck innen auf die Geschoßhülle
l_{sp}	mm	größte Länge der Sprengstoffüllung

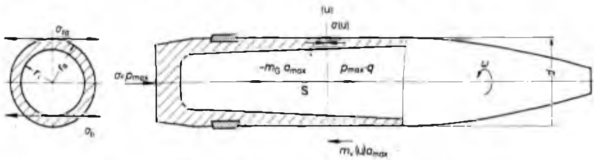


Bild 1141. *Geschoßhülle mit verwendeten Bezeichnungen.*

Die Trägheitskräfte bei der *Translationsbewegung* eines Geschosses im Rohr bewirken in der *Geschoßhülle* in einem beliebigen Querschnitt (u) die Beanspruchung entsprechend dem Grundgesetz der Dynamik

$$\sigma(u) = \frac{m_V(u)\, a_{max}}{f(u)} .$$

Die maximale Geschoßbeschleunigung a_{max} läßt sich aus folgendem Zusammenhang errechnen:

$$p_{max}\, q = m_G\, a_{max}$$

$$a_{max} = \frac{p_{max}\, q}{m_G} ;$$

in die obenstehende Gleichung für $\sigma(u)$ eingesetzt, schreibt sich diese dann:

$$\sigma(u) = \frac{m_V(u)\, q}{m_G\, f(u)}\, p_{max} .$$

Am *Geschoßboden* wird die dem maximalen Gasdruck entsprechende Druckbeanspruchung $\sigma = p_{max}$.

Die Zentrifugalkraft bei der *Rotationsbewegung* des Geschosses erzeugt folgende Beanspruchungen:

a) bei *dünnwandigen* Hüllen ist die durch die Fliehkräfte hervorgerufene Tangentialspannung

$$\sigma_t = \rho_H \omega_0^2 r^2$$

b) bei *dickwandigen* Hüllen tritt ein dreiachsiger Spannungszustand entsprechend der Beanspruchung umlaufender Hohlzylinder auf; in Umfangsrichtung entstehen daher die Tangentialspannungen

innen: $$\sigma_{ti} = 0{,}858\ \rho_H \omega_0^2 r_a^2 [1 + 0{,}167 (\frac{r_i}{r_a})^2],$$

außen: $$\sigma_{ta} = 0{,}858\ \rho_H\ \omega_0^2 r_a^2 [(\frac{r_i}{r})^2 + 0{,}167];$$

in radialer Richtung wirkt die Radialspannung

$$\sigma_r = 0{,}429\ \rho_H \omega_0^2 r_a^2 [1 + (\frac{r_i}{r_a})^2 - (\frac{r_i}{r})^2 - (\frac{r}{r_a})^2];$$

in Längsrichtung ergibt sich die Spannung

$$\sigma_{xa} = -\sigma_{xi} = -0{,}107\ \rho_H \omega_0^2 r_a^2 [1 - (\frac{r_i}{r_a})^2].$$

(ω_0 = Winkelgeschwindigkeit an der Rohrmündung)

Zusammenhang zwischen axialer und tangentialer Bewegung:

	$\omega_0 = \frac{2v_0}{d} \tan \alpha_E$	die Winkelgeschwindigkeit an der Rohrmündung.
	$v_{r(max)} = v_0 \tan\alpha_E$	die Umfangsgeschwindigkeit an der Rohrmündung bei kalibergleichen Geschossen
und	$v_{r(max)} = v_0 \frac{d_1}{d} \tan \alpha_E$	die Umfangsgeschwindigkeit an der Rohrmündung bei unterkalibrigen Geschossen (mit d_1 = Unterkaliber und d = Kaliber).

Bei der Beanspruchung der Geschoßhüllen durch den *Sprengstoffdruck* wird der Sprengstoff rechnerisch wie eine Flüssigkeit behandelt. Der hydrostatische Druck $p_{sp} = \rho_{sp} l_{sp} a_{max}$ erzeugt folgende Beanspruchungen:

a) in Umfangsrichtung die Tangentialspannung

$$\sigma_{ti} = p_{sp} \frac{(\frac{r_a}{r_i})^2 + 1}{(\frac{r_a}{r_i})^2 - 1};$$

b) in radialer Richtung die dem hydrostatischen Druck entsprechende Radialspannung

$$\sigma_{ri} = p_{sp}.$$

Bei der Beanspruchung durch den *Gasdruck*, der hinter dem Führungsband auf die Geschoßhülle wirkt, erfolgt die Berechnung wie bei einem Rohr unter Außendruck.

In Umfangsrichtung ist die Tangentialspannung

$$\sigma_{t\,(p_{max})} = p_{max} \frac{2}{1 - \left(\frac{r_i}{r_a}\right)^2};$$

in radialer Richtung sind die Spannungen

$$\sigma_{ra} = p_{max},$$

$$\sigma_{ri} = 0.$$

Die *Beanspruchung* der Geschoßhüllen *unter dem Führungsband* tritt beim Einschneiden eines Führungsbandes in die Züge als radiale Beanspruchung des unter dem Führungsband liegenden Teils der Geschoßhülle auf. Die Größe dieser Beanspruchung hängt von den Abmessungen und vom Werkstoff des Führungsbandes sowie von der Art und der Anzahl der Züge ab. Rechnerisch läßt sie sich nur schwer erfassen. Deshalb bildet man die Hüllen an dieser Stelle besonders kräftig aus, was insbesondere bei dünnwandigen Ausführungen (z.B. bei Minengeschossen) einen Mehraufwand in der Fertigung bedeuten kann.

12. Raketen

Obgleich das technische Prinzip der Raketen spätestens seit dem 13. Jahrhundert in unserem Kulturkreis bekannt ist hat es erst seit den vierziger Jahren dieses Jahrhunderts größere Bedeutung gewonnen. Heute ist die Rakete die Basis der Weltraumtechnik, und sie nimmt eine entscheidende Rolle in der Wehrtechnik ein.

Das wesentliche Merkmal der Rakete, der Reaktionsantrieb, läßt sich geschichtlich bis etwa 100 v.Chr. zurückverfolgen, als der griechische Philosoph Heron von Alexandrien diese Antriebsart mit seinem Äolus-Ball experimentell verifizierte.

Über viele Jahrhunderte hinweg zählte die Herstellung und die Anwendung von Raketen zur Kunst der Feuerwerker. Als Waffen wurden sie verschiedentlich in Form von Brandraketen und später auch mit Sprengköpfen eingesetzt; insofern hat die Raketenwaffe eine ältere Tradition als die Rohrwaffe, wenn auch die letztere seit dem 14. Jahrhundert dominant war [1].

Die Schaffung der wissenschaftlichen Grundlagen und die Entwicklung der Raketentechnik ist insbesondere mit den Namen ZIOLKOWSKI, GODDARD, OBERTH und v. BRAUN verbunden.

Das entscheidende Merkmal der Rakete im Unterschied zu einem im Rohr beschleunigten Projektil besteht darin, daß bei der Rakete das Antriebsaggregat mit dem Treibstoff Bestandteil des Projektils ist. In einer Brennkammer werden flüssige und/oder feste Treibstoffe in heiße Gase mit erhöhtem Druck überführt, die durch eine Expansionsdüse mit hoher Geschwindigkeit nach hinten austreten. Nach dem Impulssatz der Mechanik führen die nach hinten ausströmenden Gase zu einer Reaktionskraft, die – bezogen auf das Projektil – nach vorn gerichtet ist und dieses antreibt; das ist der Schub. Während ein im Rohr beschleunigtes Projektil bereits nach einigen Millisekunden beim Verlassen des Rohres seine maximale Geschwindigkeit erhält, läßt sich die Antriebsphase bei Raketen über viele Sekunden oder Minuten hinaus ausdehnen.

Dies führt einmal dazu, daß die Beschleunigungskräfte beim Antrieb der Rakete um etwa fünf Größenordnungen geringer sind, so daß die Gesamtstruktur bei der Rakete wesentlich leichter dimensioniert werden kann als bei Rohrwaffenmunition. Die geringen Beschleunigungskräfte haben für wehrtechnisches Gerät insbesondere dann Bedeutung, wenn das Projektil mit einer aufwendigen und damit mechanisch empfindlichen Elektronik und Sensoren (z.B. mit einem Zielsuchkopf) ausgestattet werden soll.

12. Raketen

Obgleich das technische Prinzip der Raketen spätestens seit dem 13. Jahrhundert in unserem Kulturkreis bekannt ist hat es erst seit den vierziger Jahren dieses Jahrhunderts größere Bedeutung gewonnen. Heute ist die Rakete die Basis der Weltraumtechnik, und sie nimmt eine entscheidende Rolle in der Wehrtechnik ein.

Das wesentliche Merkmal der Rakete, der Reaktionsantrieb, läßt sich geschichtlich bis etwa 100 v.Chr. zurückverfolgen, als der griechische Philosoph Heron von Alexandrien diese Antriebsart mit seinem Äolus-Ball experimentell verifizierte.

Über viele Jahrhunderte hinweg zählte die Herstellung und die Anwendung von Raketen zur Kunst der Feuerwerker. Als Waffen wurden sie verschiedentlich in Form von Brandraketen und später auch mit Sprengköpfen eingesetzt; insofern hat die Raketenwaffe eine ältere Tradition als die Rohrwaffe, wenn auch die letztere seit dem 14. Jahrhundert dominant war [1].

Die Schaffung der wissenschaftlichen Grundlagen und die Entwicklung der Raketentechnik ist insbesondere mit den Namen ZIOLKOWSKI, GODDARD, OBERTH und v. BRAUN verbunden.

Das entscheidende Merkmal der Rakete im Unterschied zu einem im Rohr beschleunigten Projektil besteht darin, daß bei der Rakete das Antriebsaggregat mit dem Treibstoff Bestandteil des Projektils ist. In einer Brennkammer werden flüssige und/oder feste Treibstoffe in heiße Gase mit erhöhtem Druck überführt, die durch eine Expansionsdüse mit hoher Geschwindigkeit nach hinten austreten. Nach dem Impulssatz der Mechanik führen die nach hinten ausströmenden Gase zu einer Reaktionskraft, die – bezogen auf das Projektil – nach vorn gerichtet ist und dieses antreibt; das ist der Schub. Während ein im Rohr beschleunigtes Projektil bereits nach einigen Millisekunden beim Verlassen des Rohres seine maximale Geschwindigkeit erhält, läßt sich die Antriebsphase bei Raketen über viele Sekunden oder Minuten hinaus ausdehnen.

Dies führt einmal dazu, daß die Beschleunigungskräfte beim Antrieb der Rakete um etwa fünf Größenordnungen geringer sind, so daß die Gesamtstruktur bei der Rakete wesentlich leichter dimensioniert werden kann als bei Rohrwaffenmunition. Die geringen Beschleunigungskräfte haben für wehrtechnisches Gerät insbesondere dann Bedeutung, wenn das Projektil mit einer aufwendigen und damit mechanisch empfindlichen Elektronik und Sensoren (z.B. mit einem Zielsuchkopf) ausgestattet werden soll.

Zum anderen, und hier liegt neben der Anwendung in der Weltraumtechnik die entscheidende Bedeutung der wehrtechnischen Anwendung, lassen sich durch Raketen Nutzlasten über wesentlich größere Entfernungen transportieren, als dies mit Rohrwaffen möglich ist. Bei Rohrwaffen gibt es, bedingt durch die Festigkeitsgrenzen der Werkstoffe und die besonderen gasdynamischen Vorgänge bei der Projektilbeschleunigung, eine obere Grenze für die Projektilgeschwindigkeit, die zu einer Begrenzung der Reichweite führt. Bei der Rakete besteht diese Begrenzung nicht; es läßt sich – teilweise unter Verwendung von partiellen Kreisbahnen – jede Reichweite auf der Erde erzielen. Darüber hinaus ist es eben möglich, das Schwerefeld der Erde zu verlassen, um den Mond oder andere Planeten zu erreichen.

Neben der großen Reichweite zeichnet sich die Rakete auch dadurch aus, daß sich mit ihr große Nutzlasten transportieren lassen, was in der wehrtechnischen Anwendung bedeutet, daß atomare Gefechtsköpfe mit einer Sprengkraft von mehreren Megatonnen TNT, Mehrfachgefechtsköpfe und andere Varianten mit aufwendigen Steuereinrichtungen ins Ziel gebracht werden können.

Für konventionelle Anwendungen (Artillerie, Panzerbekämpfung und Abwehr von Tieffliegern) kann es auch zweckmäßig sein, das Antriebsprinzip der Rakete und der Rohrwaffe zu kombinieren. Das führt zum sogenannten nachbeschleunigten Geschoß. [1)]

Die Firma Rheinmetall konnte zur Entwicklung der Raketentechnik verschiedene Beiträge leisten. So wurde z.B. 1937 eine Regeldüse entwickelt. Während des zweiten Weltkrieges entstanden u.a. die vierstufige Fernartillerierakete „Rheinbote" und die zweistufige Fla-Rakete „Rheintochter". Anfang der sechziger Jahre wurde eine leichte Artillerierakete entwickelt, die sich durch Drallstabilisierung und damit verbundene kurze Baulänge auszeichnet.

Im folgenden soll hier ein kurzer Überblick über den Aufbau der Raketen gegeben werden; außerdem werden die besonderen Merkmale der ungelenkten und der gelenkten Raketen behandelt. Nach einigen Bemerkungen über die Gefechtsköpfe von Raketen sind abschließend die Daten verschiedener bekannter Raketenwaffen zusammengestellt. Ausführungen zur inneren und äußeren Ballistik der Rakete finden sich in den Kapiteln 2 und 3. Für ein eingehenderes Studium der Raketentechnik wird z.B. auf die Bücher von W.WOLFF [2], L. DAVIS u.a. [3], M. BARRÈRE u.a. [4] sowie R.E. KUTTERER [5] verwiesen.

[1)] Vgl. 11.2.6.

12.1. Aufbau der Raketen

Eine Rakete setzt sich aus folgenden wesentlichen Baugruppen zusammen:

- Raketenmotor,
- Nutzlast,
- Stabilisierungs- und/oder Lenkeinrichtung.

Sie wird von einer Startvorrichtung in Form eines Gestelles, einer Schiene oder eines Führungsrohres abgeschossen.

In Bild 1201 ist der Aufbau von flügelstabilisierten Raketen mit Festtreibstoff, diergolem und monergolem Flüssigtreibstoff sowie Hybridtreibstoff schematisch dargestellt.

Die physikalisch-chemischen Grundlagen zu diesen Antriebsarten sind in den Kapiteln 1 und 2 angegeben.

Allen Antriebsarten gemeinsam ist die Brennkammer, in der aus dem mitgeführten Energieträger die heißen Gase bei erhöhtem Druck erzeugt werden. Daran schließt sich nach hinten die Expansionsdüse (Lavaldüse) an, aus der die Gase in stoßfreier Expansion mit Überschallgeschwindigkeit (2000 bis 3000 m/s) austreten.

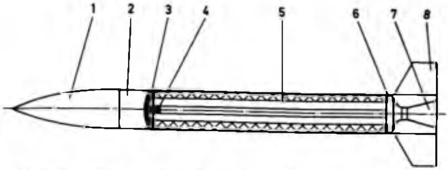
Beim Feststofftriebwerk ist der Treibstoff direkt in der Brennkammer untergebracht. Er wird dort unter Verdämmung mit Hilfe einer Anfeuerungsladung gezündet. Die entsprechend der innenballistischen Auslegung nicht für den Abbrand vorgesehene Oberfläche des Treibsatzes ist mit einer Schutzschicht (Isolation) versehen bzw. mit der Wand der Brennkammer fest verklebt.

Diergole Flüssigkeitstriebwerke besitzen je einen Tank für den Brennstoff und den Oxydator, aus denen die Komponenten mit Hilfe von Förderpumpen oder Druckgas über Einspritzdüsen der Brennkammer zur Reaktion zugeführt werden.

Die Zündung erfolgt im allgemeinen spontan beim Kontakt der Komponenten (hypergole Treibstoffe).

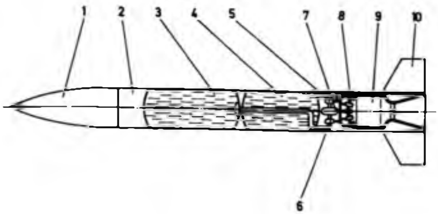
Bei monergolen Triebwerken wird der flüssige Treibstoff mit entsprechenden Mitteln – wie bei den diergolen Triebwerken – in die Brennkammer gefördert und dort gezündet oder durch Kontakt mit einem Katalysatorbett umgesetzt. Die Bedeutung der monergolen Triebwerke ist gering; sie können jedoch aufgrund jüngerer Ergebnisse auf der Basis von Hydrazin und schnellen Katalysatoren für Steuertriebwerke bei Satelliten interessant werden [6].

Hybride Triebwerke zeichnen sich dadurch aus, daß eine Treibstoff-Komponente, im allgemeinen der Brennstoff, als Feststoff in der



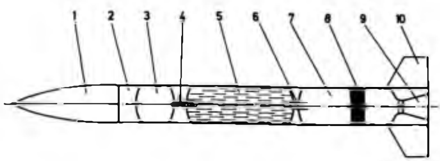
1 Nutzlast
2 Raum für Steueraggregate
3 Federring
4 Anfeuerung
5 Treibsatz
6 Abstützung
7 Düse
8 Leitwerk

Rakete mit Feststofftriebwerk (Innenbrenner)



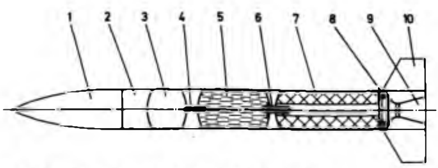
1 Nutzlast
2 Raum für Steueraggregate
3 Oxydatortank
4 Brennstofftank
5 Brennstoffpumpe
6 Oxydatorpumpe
7 Turbinen für den Antrieb der Treibstoffpumpen
8 Einspritzdüsen
9 Gekühlte Brennkammer mit Schubdüse
10 Leitwerk

Rakete mit diergolem Flüssigkeitstriebwerk



1 Nutzlast
2 Raum für Steueraggregate
3 Druckgastank
4 Regelventil
5 Treibstofftank
6 Einspritzdüse
7 Brennkammer
8 Katalysator
9 Düse
10 Leitwerk

Rakete mit monergolem Flüssigkeitstriebwerk



1 Nutzlast
2 Raum für Steueraggregate
3 Druckgastank
4 Regelventil
5 Tank mit flüssigem Oxydato
6 Einspritzdüse
7 Fester Brennstoff
8 Abstützung
9 Düse
10 Leitwerk

Rakete mit hybridem Triebwerk

Bild 1201. *Aufbau der Raketen mit verschiedenen Triebwerksarten.*

Brennkammer angeordnet ist und die andere Komponente, im allgemeinen der Oxydator, als Flüssigkeit zugeführt wird. Die Zündung erfolgt auch hier vorzugsweise spontan beim Kontakt der Komponenten.

Während die großen Raketen für Weltraummissionen mit diergolen Flüssigkeitstriebwerken arbeiten, wobei der Treibstoff vor dem Start aufgetankt wird, verwenden militärische Raketen wegen der Notwendigkeit laufender Einsatzbereitschaft bisher vornehmlich Festtreibstoffe. Um die Möglichkeit der Schubsteuerung zu haben, finden aber auch diergole und hybride Antriebe Verwendung. Dabei ist dann eine lagerfähige Kapselung der Treibstoff-Komponenten erforderlich („prepackage'').

12.2. **Ungelenkte Raketen**

Die ungelenkten Raketen sind dadurch gekennzeichnet, daß ihre Flugbahn durch die Auslegung des Antriebs, die Massen, die aerodynamischen Verhältnisse und die Abgangsrichtung festgelegt ist. Der Antrieb kann — wie bei den gelenkten Raketen — sowohl einstufig als auch mehrstufig erfolgen. Beim mehrstufigen Antrieb nutzt man den Vorteil aus, daß die jeweils ausgebrannte Brennkammer von der Rakete abgetrennt wird und nicht als Totmasse weiter mit angetrieben werden muß.

Hand in Hand mit dem Verzicht auf eine besondere Lenkeinrichtung geht die Notwendigkeit der außenballistischen Stabilisierung. Die ungelenkten Raketen erfüllen ihren Auftrag wegen der Streuung im Ziel nur bei begrenzten Reichweiten. Die Flugbahn beschränkt sich im wesentlichen auf den lufterfüllten Raum. Die Stabilisierung erfolgt — wie bei den Geschossen — aerodynamisch, also durch Leitwerke, oder durch Drall.

Die Leitwerke zur *aerodynamischen Stabilisierung* befinden sich am Raketenheck, da sie die Aufgabe haben, den Angriffspunkt der Luftkräfte möglichst weit in den hinteren Bereich des Raketenkörpers (hinter den Schwerpunkt) zu legen; sie sind starr oder klappbar ausgeführt und ragen im allgemeinen über den Durchmesser des Raketenkörpers hinaus.

Klappleitwerke werden bei militärischen Raketen gelegentlich bevorzugt, weil mit eingeklapptem Leitwerk die erforderlichen Stapel- und Transportvolumina geringer gehalten werden können. Darüber hinaus lassen sich Raketen mit Klappleitwerken aus Führungsrohren verschießen, die z.B. bei leichten Artillerieraketen in Bündeln zu einem Werfer zusammengefaßt werden.

Um beim Klappleitwerk Bahnstörungen zu vermeiden, sollten die Flügel direkt nach dem Öffnen verriegeln; außerdem ist anzustreben, daß die einzelnen Flügel miteinander gekoppelt sind, so daß das Öffnen gleichmäßig erfolgt.

Zum Ausgleich fertigungsbedingter Unsymmetrien der Massenverteilung des Raketenkörpers und des Schubvektors, d.h. um diese für die Flugbahn möglichst unwirksam zu machen, wird auch der aerodynamisch stabilisierten Rakete häufig ein geringer Drall erteilt, den man durch Anstellung der Leitwerke oder beim Abschuß durch eine spiralförmige Führungsnut in der Abschußvorrichtung erzeugt.

Bei *drallstabilisierten* Raketen wird auf Leitwerke verzichtet. Die Stabilisierung erfolgt ausschließlich durch den Drall, der dann natürlich wesentlich höher sein muß als der Ausgleichsdrall bei den aerodynamisch stabilisierten Raketen.

Der erforderliche Drall wird im allgemeinen durch eine entsprechende Komponente des Schubvektors erzeugt. Zu diesem Zweck benutzt man eine kranzförmige Anordnung von angestellten Schubdüsen, die entweder gleichzeitig den Schub für den Antrieb in Bahnrichtung mitliefern oder von der Hauptdüse getrennt sein können. Die Drallerzeugung durch Schub läßt sich natürlich auch mit Zügen in dem Abschußrohr kombinieren, durch welche ein ausreichender Anfangsdrall sichergestellt wird.

Da neben der Stabilität auch die Folgsamkeit auf der Bahn zu fordern ist, ergibt sich für die drallstabilisierte Rakete eine Einschränkung für das Verhältnis von Länge zu Kaliber; diese lautet: $L/D \leqslant 7$.

Die für die Stabilisierung erforderliche Drehzahl der Rakete läßt sich analog zu der erforderlichen Drehzahl bei Geschossen berechnen (s. Kap. 11).

Drallstabilisierte Raketen lassen sich als Artillerieraketen einsetzen und werden in Form von nachbeschleunigten Geschossen (s. 11.2.6) verwendet; sie arbeiten mit Festtreibstoffen.

Dem Vorteil des geringen Systemgewichtes und damit einer erhöhten Mobilität, über den die ungelenkten Raketenwaffen im Vergleich zu den Rohrwaffen verfügen, steht der Nachteil der wesentlich größeren Streuung im Ziel gegenüber.

In Bild 1202 ist die Streuung einer ungelenkten Artillerierakete der einer Artillerie-Rohrwaffe etwa gleicher Reichweite gegenübergestellt [7].

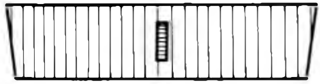


Bild 1202. *Vergleich der Streuung einer Artillerierakete und einer entsprechenden Rohrwaffe bei einer Schußweite von 15 km.*

Die Streuungsursachen bei ungelenkten Raketen sind:

Zufälliger Winkel zwischen Bahntangente und Schubvektor aufgrund der bei jedem Projektil auftretenden Anstellung;

Unsymmetrien im Schubvektor;

Unsymmetrien im Leitwerk;

Windeinfluß: Bei Seitenwind dreht die Rakete auf dem aktiven Bahnabschnitt in den Wind, d.h. die Seitenabweichung der Bahn ist zur Windrichtung entgegengesetzt. Die Seitenablage bis zum Brennschluß ist im allgemeinen um eine Größenordnung größer als bei nicht angetriebenen Projektilen. Nach Brennschluß verhält sich die Rakete wie ein normales Geschoß bei Wind (s. Kap. 3);

Einfluß der Startschienenlänge sowie Schwingungen des Startgestells und der Rakete während des Abschusses.

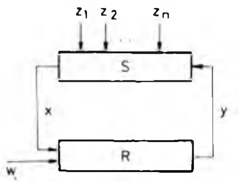
Wegen der vergleichsweise großen Streuung der ungelenkten Raketen werden diese vornehmlich als Flächenfeuerwaffen eingesetzt, wobei besondere Gefechtsköpfe und Zünder Verwendung finden.

12.3. Gelenkte Raketen

Die gelenkten Raketen, also Flugkörper mit Reaktionsantrieb, bei denen während des Fluges ins Ziel laufend eine Kursüberwachung und ggf. Kursänderung erfolgt, gehören wohl zu den technisch interessantesten Waffen.

Eine Lenkung wird bei militärischen Raketen teilweise verwendet, um gegen feststehende Ziele die Treffgenauigkeit zu erhöhen; insbesondere ist die Lenkung aber entscheidend für die Funktion von Verfolgungsraketen, die gegen bewegte Luft-, Boden- oder Seeziele eingesetzt werden.

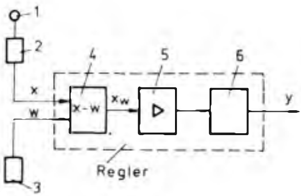
Das technische System einer gelenkten Rakete läßt sich als Regelkreis [8] beschreiben, wie er in Bild 1203 in einfachster Form dargestellt ist.



S = Regelstrecke (Rakete mit Lenkmittel)
R = Regler
x = Regelgröße (Flugbahn)
w = Führungsgröße (Sollflugbahn)
y = Stellgröße (Stellung der Lenkmittel)
z = Störgröße

Bild 1203. *Die gelenkte Rakete als Regelkreis.*

Die Regelstrecke S besteht aus der eigentlichen Rakete mit dem Lenkmittel wie z.B. Luftrudern. Die Stellgröße y am Eingang der Regelstrecke ist die Stellung der Lenkmittel; die Regelgröße x als Ausgang der Regelstrecke ist der Kurs der Rakete. Neben der Stellgröße y wirken auf die Regelstrecke die Störgrößen $z_1 \ldots z_n$, die teilweise als Ursachen der Streuung bei ungelenkten Raketen unter 12.2 angesprochen wurden. Der Regler R, der die Regelgröße x und die Führungsgröße w zur Stellgröße y verarbeitet, besteht aus dem Vergleichsgerät für Regel- und Führungsgröße (Soll-/Istwert-Vergleich), einem Verstärker und einem Stellglied zum Antrieb der Lenkmittel, wie in Bild 1204 gezeigt.



1 Meßfühler
2 Meßumformer
3 Sollwertgeber
4 Vergleichsgerät
5 Verstärker
6 Stellglied

Bild 1204. . *Komponenten des Reglers.*

Man erkennt aus dieser Abbildung, daß neben dem Regler noch der Meßfühler mit Umformer für die Regelgröße und der Geber für die Führungsgröße (Sollwertgeber) erforderlich sind.

Im folgenden soll auf die charakteristischen Komponenten des Regelkreises „gelenkte Rakete" kurz eingegangen werden. Dabei muß hier allerdings auf eine Darstellung des dynamischen Verhaltens dieses Regelkreises verzichtet werden.

Lenkmittel

Die Lenkung eines Körpers bedeutet die Änderung seiner Bahn; diese Änderung ist durch Kräfte, die senkrecht zur Bahn wirken, zu erreichen. Solche Kräfte lassen sich bei den Raketen durch folgende verstellbare Lenkmittel erzeugen:

Luftruder,
Strahlruder,
schwenkbarer Raketenmotor,
besondere Lenktriebwerke.

Luftruder sind anstellbare Leitwerksflächen, die entweder großflächig am Heck der Rakete zusammen mit dem Stabilisierungsleitwerk angeordnet oder auch in kleineren Abmessungen am vorderen Teil installiert sind. Die Luftruder am vorderen Teil der Rakete erzeugen einen größeren Auftrieb und damit ein größeres Lenkmoment je Flächeneinheit. Die am Luftruder erzeugten Querkräfte entstehen durch die Luftströmung, also aerodynamisch. Betrag und Richtung der Querkraftresultierenden sind von der Anstellung der Luftruder abhängig, die durch das Stellglied in Form eines Servomotors erfolgt.

Der Vorteil der Luftruder als Lenkmittel besteht darin, daß sie auch auf der passiven Bahn (nach Brennschluß) der Rakete arbeiten. Sie werden daher vorzugsweise bei Verfolgungsraketen eingesetzt.

Strahlruder sind Auftriebskörper, die man in der Austrittsöffnung der Raketendüse anbringt; sie werden also von den Treibstoffgasen angeströmt und erzeugen so – je nach Anstellung – die für die Lenkung erforderlichen Querkräfte.

Da die Strahlruder einer hohen thermischen Belastung ausgesetzt sind, unterliegen sie während ihres Einsatzes einem starken Verschleiß, so daß selbst bei Verwendung günstiger Materialien wie Graphit eine Abnutzung und damit maßliche Veränderung auftritt.

Strahlruder sind z.B. bei der Polaris-Rakete verwendet worden [9].

Die modernen Großraketen werden mit Hilfe *schwenkbarer Raketenmotoren* gelenkt; d.h. die Triebwerke sind in zwei Achsen schwenkbar gelagert (kardanische Aufhängung). Diese Art der Lenkung hat heute zweifellos die größte technische Bedeutung neben der aerodynamischen Lenkung durch Luftruder.

Letztlich läßt sich eine Raketenlenkung natürlich auch durch *besondere Lenktriebwerke* darstellen, die einen Schub senkrecht zur Flugrichtung erzeugen und durch das Stellglied des Raketen-Regelkreises je nach Regelzustand intermittierend gezündet werden. Dieses Lenkmittel wird ebenfalls für die Lagestabilisierung sowie die Bahnänderung und Bahnkorrektur von Satelliten verwendet.

Istwertgeber

Im Regelkreis der gelenkten Rakete besteht der Istzustand im Prinzip in den sechs Freiheitsgraden der Raketen und deren zeitlicher Ableitung.

Von den Bewegungen der Rakete um ihre Hauptachsen interessieren jedoch im allgemeinen nur die Anstellungen um die Quer- und die Hochachse (Nicken und Gieren). Zur Messung dieser Größen werden *Kreiselplattformen* verwendet, die aus kardanisch aufgehängten Kreiseln bestehen, deren Auslenkung gegenüber dem raketenfesten System als elektrische Spannung an einem entsprechend angebrachten Potentiometer abgegriffen wird.

Die Messung der Beschleunigung in allen Freiheitsgraden kann ebenfalls raketenintern (z.B. durch piezoelektrische Geber) erfolgen, so daß sämtliche Daten der Rakete über die zurückgelegte Bahn und den aktuellen Bewegungszustand ohne äußere Informationen in ihr selbst in für die Lenkung geeigneter Form dargestellt werden können.

Diese Erzeugung der Istwertinformationen der Rakete wird benutzt, wenn ihr vor dem Start ein vorgegebenes Flugbahnprogramm aufgegeben wird oder in modifizierter Form auch bei Raketen mit Zielsuchkopf.

Bei Raketen, die boden- oder trägergestützt gelenkt werden, erfaßt man die Bahndaten der Rakete ebenso wie die des Zieles von der Kommandozentrale aus. Im Falle von Panzerabwehrraketen wird die Raketenbahn teilweise optisch verfolgt; sonst verwendet man eine Radarvermessung.

Aus der folgenden Darstellung der Leitverfahren wird ersichtlich, daß häufig nur reduzierte Istwerte der Raketenbewegung für die Lenkung benötigt werden.

Sollwertgeber (Leitverfahren)

Der Sollwertgeber erzeugt die Führungsgröße des betrachteten Regelkreises; er bestimmt also die Bahn der Rakete. Der zeitliche Verlauf der Führungsgröße hat so zu sein, daß das Ziel getroffen wird; d.h. die Führungsgröße wird wesentlich von den Bahnkoordinaten des Zieles bestimmt. Es werden je nach Erzeugung der Führungsgröße drei Leitverfahren unterschieden:

Zielsuchverfahren,
Leitstrahlverfahren,
Kommandoverfahren.

Beim *Zielsuchverfahren* wird die Ziellage in bezug auf die Rakete laufend durch einen Zielsuchkopf in der Spitze der Rakete gemessen und als Führungsgröße für die Lenkung in das Ziel benutzt. Je nach Auslegung der Lenkungsregelung bewegt sich die Rakete auf einem Verfolgungs- oder einem Vorhaltkurs zum Ziel. Im ersten Falle entsteht als Raketenbahn die sogenannte „Hundekurve", im zweiten Fall spricht man auch vom „Kollisionsverfahren". Der Unterschied zwischen den beiden Regelungsarten besteht darin, daß sich beim Verfolgungskurs die Rakete immer in Richtung auf das Ziel bewegt, um dieses schließlich

einzuholen, während beim Vorhaltverfahren die Rakete zu dem vorausberechneten Kollisionspunkt mit dem Ziel fliegt. Dabei werden natürlich Bahnänderungen des Zieles durch die Lenkung berücksichtigt. Die Funktionsweise der Zielsuchköpfe ist in drei Arten möglich:

passiv,
aktiv,
halbaktiv.

Passive Zielsuchköpfe registrieren vom Ziel emittierte Energie und stellen damit die Zielrichtung fest. Diese Energie kann z.B. die von den Triebwerken eines Flugzeuges abgegebene Infrarotstrahlung sein (IR-Suchköpfe).

Aktive Zielsuchköpfe strahlen selbst Energie aus (z.B. Radar), die vom Ziel reflektiert und bei entsprechender Strahlrichtung vom Suchkopf wieder empfangen wird.

Bei den *halbaktiven Zielsuchköpfen* wird das Ziel vom Boden oder Raketenträger aus beleuchtet (Radar, IR), und der Suchkopf der Rakete empfängt die vom Ziel reflektierte Energie des raketenunabhängigen Senders.

Nach dem Zielsuchverfahren sei das *Leitstrahlverfahren* kurz beschrieben. Hierbei wird von der Abschußstelle aus das Ziel mit einem Strahl elektromagnetischer Energie verfolgt und die Rakete in Richtung des Strahles abgeschossen. Am Heck der Rakete befindet sich ein Empfänger, der während des Fluges ins Ziel die Abweichung der Raketenbahn vom Leitstrahl mißt und auf den Reglereingang der Rakete zur Erzeugung der für die Bahnkorrektur erforderlichen Stellgröße gibt.

Das *Kommandoverfahren* schließlich stellt die in der Auslegung flexibelste Lenkung von Raketen dar. Es arbeitet in folgender Weise: Vom Abschußort aus werden Ort und Geschwindigkeit sowohl des Zieles als auch der Rakete laufend gemessen (z.B. durch Radar) und mit Hilfe eines Rechners zu Lenksignalen für die Rakete verarbeitet, welche dieser als Lenkkommandos durch Sender oder bei Panzerabwehrraketen auch über Draht übertragen werden.

Es sind auch Kombinationen zwischen dem Zielsuchverfahren und dem Kommandoverfahren möglich.

12.4. Gefechtsköpfe

Die Aufgabe der Rakete als Waffe besteht darin, einen Gefechtskopf als Träger von Zerstörungsenergie ins Ziel zu transportieren. Je nach Art des zu bekämpfenden Zieles gibt es eine Vielfalt technischer Ausführungen von Gefechtsköpfen.

Gegen Panzer verwendet man im Direktbeschuß Hohlladungsgefechtsköpfe (s. 1.4.6.3).

Zum Abschuß von Flugzeugen werden Sprengladungen mit einer Belegung vorgeformter Splitter eingesetzt. Die Ladung wird beim kleinsten Abstand Rakete/Flugzeug durch einen Annäherungszünder zur Detonation gebracht. Die Funktion des Annäherungszünders ist häufig mit dem Lenksystem gekoppelt.

Gegen Schiffe verwendet man große Sprengladungen, teilweise mit besonders ausgeführter Belegung, und zündet mit Verzögerung nach dem Aufschlag.

Gegen Flächenziele werden als konventionelle Gefechtsköpfe ebenfalls kompakte Sprengladungen, aber auch Streuladungen verschiedener Wirkungsweise zum Zerstören des Ziels oder Stören des Angriffs eingesetzt; diese werden dann im optimalen Abstand über dem Boden ausgestoßen.

12.5. Raketenwerfer

Um den Raketen beim Abschuß eine definierte Anfangsrichtung für die Flugbahn zu geben, werden Startgestelle (Raketenwerfer) verwendet, in denen sie während der Anfangsbeschleunigung über eine gewisse Länge geführt werden. Die Führung kann in Form einer Schiene, eines Rohres o.ä. ausgebildet sein.

Das Richten der Rakete in ihrer Führung geschieht mit Hilfe von Richtantrieben nach Höhe und Seite.

Bei Artillerieraketen und teilweise auch bei Fliegerabwehrraketen sind an einem Startgestell mehrere Raketen angebracht; d.h. das Startgestell besteht aus einer Reihe von Führungseinrichtungen wie Rohren oder Schienen, die starr miteinander verbunden sind und mit Hilfe des gemeinsamen Antriebes gerichtet werden.

Diese Mehrfachwerfer werden vor dem Einsatz komplett mit Raketen geladen, die dann im geeigneten Zeitabstand nacheinander gestartet werden. Für Artillerieraketen ist der Zeitabstand von Schuß zu Schuß sehr klein, um die zu bekämpfende Zielfläche einem wirksamen Feuerschlag auszusetzen.

Da die auf die Raketenwerfer beim Abschuß wirkenden Kräfte im Gegensatz zum Geschütz äußerst gering sind, können diese auch als Mehrfachwerfer sehr leicht gebaut werden. Man montiert sie auf LKW, Anhänger, leichte Panzerfahrzeuge o.ä.

Als Beispiel eines Mehrfachwerfers sei hier der von Rheinmetall für einen Schützenpanzer entwickelte „Salvenautomat" erwähnt. Dieses Gerät war vorgesehen für eine drallstabilisierte Artillerierakete im Kaliber 160 mm.

In Bild 1205 ist eine Aufnahme des Werfers von der Seite in Feuerstellung wiedergegeben. Er besteht aus sechs nebeneinander liegenden Abschußrohren, die automatisch sechsmal hintereinander gleichzeitig geladen werden, so daß in kurzer Zeit ein Feuerschlag von insgesamt 36 Schuß erfolgen kann.

Der Richtbereich beträgt von -7° bis $+60^\circ$ in der Höhe und $\pm 90^\circ$ in der Seite. In Fahrstellung werden die Abschußrohre auf -7° abgesenkt, sie passen sich dann der Fahrzeugkontur an.

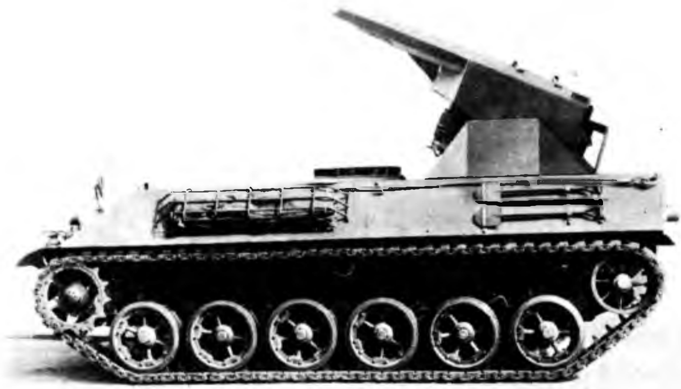


Bild 1205. *Raketen-Mehrfachwerfer auf Schützenpanzer in Feuerstellung (Rheinmetall-Entwicklung).*

12.6. Daten bekannter Raketenwaffen

In den nachfolgenden Tabellen 1201 bis 1205 sind die wichtigsten veröffentlichten Daten einer Reihe von Raketenwaffen zusammengestellt, und zwar für gelenkte und ungelenkte Panzerabwehrraketen, für Fliegerabwehrraketen, für Artillerieraketen und für ballistische Interkontinentalraketen.

Tabelle 1201. *Panzerabwehrraketen. A. Ungelenkte Flugkörper.*

Bezeichnung	Land	Länge mm	Durchm. mm	Gewicht kg	Geschw. m/s	Kampfentf. m	Bemerkungen
P 27	CS	220	120	3,75		70-150	flügelstabilisiert
RPG-2	SU	670	82	1,84	84	150	flügelstabilisiert
Panzerfaust 44-1 44-1A1	BRD	560	81	2,8	107	150-200	flügelstabilisiert
BLINDICIDE	B	700	101	2,75	195	220	flügelstabilisiert
LAW M 72, 66mm	US	635	66	1,25	145	250	flügelstabilisiert
RPG-7	SU	925	80	1,88	100 max.300	300-500	flügelstabilisiert Ausgleichsdrall
LRAC-89(STRIM)	F	600	89	2,2	290	315-500	flügelstabilisiert, Ausgleichsdrall
Schwere Panzerfaust Carl-Gustav	S		84	1,725	310	350-500	flügelstabilisiert, Ausgleichsdrall
APX-80	F	400	80	1,85	400 max.535	500-1000	flügelstabilisiert, Ausgleichsdrall

Tabelle 1202. *Panzerabwehrraketen.* *B. Gelenkte Flugkörper.*

Bezeichnung	Land	Länge mm	Durchm. mm	Gewicht kg	Geschw. m/s	Kampfentf. m	Bemerkungen
VIGILANT	GB	903 bzw. 1073	130	14,7	150	180-1370	4 Stabilisierungsflächen, Lenkung: Draht-Kommando
XM 47 DRAGON (MAW)	US	744	100	6,13		500-1500	3 Stabilisierungsflächen, klappbar, Lenkung: Draht-Infrarot
COBRA BO 810	BRD	952	100	10,6	75-90	400-1600	4 Stabilisierungsflächen, Kreisel, Lenkung: Draht
MOSQUITO	I	1100	120	14,1	90	360-1800	4 Stabilisierungsflächen, rollstabilis., Lenkung: Draht-Kommando
MILAN	F/ BRD	750	120	6,5	175	25-2000	4 Stabilisierungsflächen, klappbar, Lenkung: Draht-Kommando-Infrarot
KAM-3D	I	1000	120	15,7	85	350-2000	4 Stabilisierungsflächen, 1 Kreisel, Lenkung: Draht-Kommando
COBRA BO 2000	BRD	952	100	10,3	85	400-2000	4 Stabilisierungsflächen, Kreisel, Lenkung: Draht
ENTAC 58	F	820	150	12,2	85	400-2000	4 Stabilisierungsflächen, Lenkung: Draht-Kommando
SNAPPER	SU	1150	150	16,0	100	500-2000	4 Stabilisierungsflächen, Lenkung: Draht

BANTAM	S	800	100	6,0	85	2000	4 Stabilisierungsflächen, Kreisel, Lenkung: Draht
SAGGER	SU	710	120	8,0	250	250-2300	4 Stabilisierungsflächen, klappbar, Kreisel, Lenkung: Draht bzw.elektron.
SWATTER	SU	1150	130	17,5	230	600-2500	4 Stabilisierungsflächen, Lenkung: Draht
SHILLELAGH	US	1110	152	27	224	bis 3000	4 Stabilisierungsflächen, klappbar, 2 Kreisel, Lenkung: Funk-Fernlenkg., halbautomatisch
TOW	US	1140	152	17,4	320	65-3000	8 Kippflügel, Steuerung: Steuerrakete, Lenkung: IR u. Draht-Kommando
SWINGFIRE	GB	1070	170	70,0	190	150-3000	4 klappbare Stabilisierungsflächen, Lenkung: Draht-Kommando
SS 11 B 1	F	1210	160	29,9	200/ 210	800-3000	4 Stabilisierungsflächen, Pulverkreisel, Lenkung: Draht-Kommando
MALKARA	AUS	1970	200	100,0	120	450-3200	Bewegliche Stabilisierungsflächen, Lenkung: Draht-Kommando
ACRA	F	1245	142	26,0	150 max.550	25-3300	flügelstabilisiert, Ausgleichsdrall, Lenkung: Laser im Infrarotbereich
HOT	BRD/ F	1300	180	20,0	280	75-4000	4 Flossen, klappbar, Lenkung: IR u. Draht-Kommando
SS 12/AS 12	F	1870	210	75	103 max. 200	bis 6000	4 Stabilisierungsflächen, Kreisel, rollstabilisiert, Lenkung: Draht-Kommando

Tabelle 1203. *Fliegerabwehrraketen.*

Bezeichnung	Land	Länge mm	Durchm. mm	Flugk.-Gew. kg	Geschw. (Mach)	Reichweite (Schrägentferng.) m	Gipfelhöhe m	Bemerkungen
JAVELOT	F	800	40	3,0	1,0	2500	2000	einstufige Feststoffrakete, Lenkflossensteuerung
RAPIER	GB	2240	127	38	2,0	3000	2500	zweistufige Feststoffrakete m. Funkkommandolenkung, 4 Stabilisierungsflächen, 4 kreuzförmige Lenkflossen
REDEYE M 60A1	US	1260	70	8,2	2,5	3500	1000	zweistufige Feststoffrakete m. Infrarot-Zielsuchkopf, Steuerg.: Lenkflossen am Heck, flügelstabilisiert
BLOWPIPE	GB	1350	76	9,5	1,1	4500	3000	zweistufige Feststoffrakete m.Funkkommandolenkung (autom. od.v.Hand), Steuerung: Lenkflossen, Stabilis.: flügelstabilisiert, Ausgleichsdrall
TIGERCAT	GB	1480	190	68	1,0	5000	3000	zweistufige Feststoffrakete m.Funkkommandolenkung (optisch), 4 Lenkflossen, flügelstabil., Ausgleichsdrall
ROLAND I/II	F/ BRD	2400	160	63	1,6	6000	5500	zweistufige Feststoffrakete, Lenkung: I Infrarot-Leitstrahl II Autom.Radar-Kdo.-Lenkg, flügelstabil., Ausgleichsdrall
SEACAT	GB	1480	190	68		7000	4000	zweistufige Feststoffrakete m. Funkkommandolenkung. 4 Lenkflossen, flügelstabilis., Steuerflächen

MURENE/ MURECA	F	2900/ 800	155/ 40	75/ —	2,4/ 1	8000/ 2500	5000/ 2000	einstufige Feststoffrakete m.Infrarot-Funkkommando-lenkung, flügelstabilisiert, Steuerflächen
CROTALE (CACTUS)	F	2900	155	75	2,4	8500	5000	einstufige Feststoffrakete m.Infrarot-Funkkommando-lenkung, flügelstabilisiert, Rollsteuerung
M 730 CHAPARAL	US	2910	130	84	3,0	9000	1500	einstufige Feststoffrakete m.Infrarot-Zielsuchkopf, flügelstabilisiert
INDIGO	I	3120	190	97	2,5	10000	6000	einstufige Feststoffrakete m.Funkkommandolenkung, Lenkflossensteuerung, flügelstabilisiert
SEA INDIGO	I	3120	190	110	2,5	10000	6000	einstufige Feststoffrakete m.Funkkommandolenkung, Lenkflossen, flügelstabilis.
SAM-D	US	5000	300	500	1,0	12000	10000	einstufige Feststoffrakete m. Funkkommandolenkung, 4 Steuerflächen, flügelstabil.
ALBATROS	I	3660	203	181	2,5	13000	10000	Lenkung: halbaktiver Radar-Zielsuchkopf, Einstufen-Feststoffrakete, Steuerung: hydr. betätigte Lenkflossen, flügelstabilisiert
HAWK	US	5030	360	590	2,5	35000	12600	einstufige Feststoffrakete mit Radarlenkung
NIKE AJAX	US	10360	300	1100	2,3	40000	19000	zweistufige Flüssigtreib- u. Feststoffrakete m. Radarlenkg.
NIKE HERCULES	US	12650	800	4720	3,7	130000	47000	zweistufige Feststoffrakete, Radarlenkung

Tabelle 1204. *Artillerieraketen.*

Bezeichnung	Land	Länge mm	Durchm mm	Start-gew. kg	Reich-weite km	Geschw. km/h	Bemerkungen
LITTLE JOHN M-47	US	4420	318	345	8,0	1600	ungelenkte Einstufen-Feststoffrakete
LAR	BRD	2260	110	35	15	2340	ballistische Rakete, flügelstabilisiert (Klappflügel)
LITTLE JOHN M-51	US	4930	318	354	18,0		
HONEST JOHN M-31	US	8310	762	2676	25.9	2010	
LACROSSE	US	5840	520	1070	32,2	1290	Einstufen-Feststoffrakete mit Kommandolenkung
HONEST JOHN M-50	US	7590	762	1905	39,5		ungel. Einstufen-Feststoffrakete
LANCE	US	6000	560	1450	110		vereinfachte Trägheitslenkung (Automat)
PLUTON	US	7500	650	2500	120		
SERGEANT	US	10470	787	4580	137	3700	Einstufen-Feststoffrakete mit Trägheitslenkung
PERSHING	US	10540	1000	4500	300-700	4800	ballistische Zweistufen-Feststoffrakete m. Trägheitslenkung

Tabelle 1205. *Ballistische Interkontinental-Raketen (ICBM-Intercontinental Ballistic Missiles).*

Bezeichnung	Land	Länge m	Durchm. m	Gew. kg	Reich-weite km	Geschw. km/h	Gipfel-höhe km	Bemerkungen
POSEIDON C 3	US	10	1,9	30000	4500			U-Boot-Rakete, nuklearer Gefechtskopf 1 Mt
POLARIS A 3	US	9	1,4	14000	4500	12000		U-Boot-Rakete, nuklearer Gefechtskopf 1 Mt
SCRAG	SU	35	3	100000	8000			Dreistufen-Flüssigtreibstoff-Rakete, nuklearer Gefechtskopf 1 Mt
SAVAGE	SU	20	2	20000	8000			Dreistufige Feststoff-Rakete, nuklearer Gefechtskopf 1 Mt
SASIN	SU	25	3	80000	10000			Zweistufige Flüssigtreibstoff-Rakete, nukl.Gefechtskopf 5–10 Mt
MINUTEMAN 3	US	18	1,9	35000	11000	24000	1100	Dreistufen-Feststoff-Rakete, nukl.Gefechtskopf 1 Mt
TITAN	US	31	3	150000	15000	24000	1500	Zweistufen-Flüssigtreibstoff-Rakete, Gewicht I. Stufe 120000 kg Gewicht II. Stufe 30000 kg
SCARP	SU	35	3	150000	15000			Flüssigtreibstoff-Rakete

Literatur

[1] Führing, H.H.: Jahrb. d. Heeres 3 (1971), S. 157.

[2] Wolff, W.: Raketen und Raketenballistik. Berlin 1964.

[3] Davis, L.; Follin, J.W.; Blitzer, L.: Exterior Ballistics of Rockets. London, New York, Toronto 1958.

[4] Barrère, M.; Jaumotte, A.; Fraeijs de Veubeke, B.; Vandenkerckhove, J.: Raketenantriebe. Amsterdam, London, New York, Princeton 1961.

[5] Kutterer, R.E.: Ballistik. 3. Aufl. Braunschweig 1959.

[6] Kayser, L.T.: AGRR-TB19. Stuttgart 1970.

[7] Bender, H.: Wehrtechnik 1970, H. 8 u. 9.

[8] Preßler, G.: Regeltechnik I. Mannheim 1964.

[9] – Interavia 16 (1961), H 3, S. 327.

13. Zünder

Zünder haben die Aufgabe, einen Gefechtskopf oder eine Sprengladung im Ziel bzw. zu einem gewünschten Zeitpunkt zu zünden, d.h. zur Wirkung zu bringen.

Anzünder (Treibladungszünder, Treibladungs*an*zünder) dienen, wie der Name sagt, zum Anzünden von Treibladungen für Geschosse, Raketen u.ä. Sie sind unter 13.3 gesondert behandelt.

Das umfangreiche Gebiet der Zünder und Anzünder kann im Rahmen dieses Buches nicht in allen Einzelheiten behandelt werden; neben der Aufzählung der wichtigsten Arten kann an Hand einiger Beispiele nur ein Einblick in die Zündertechnik und die zu stellenden Forderungen gegeben werden.

13.1. Sicherheitstechnische und taktische Forderungen

Um die Funktion der Zünder und Anzünder sicherzustellen und um auszuschließen, daß sie unbeabsichtigt, etwa beim Transport, beim Einführen der Munition in die Waffe, beim Abschuß oder dgl. in Funktion treten, müssen sie neben den eigentlichen Zündvorrichtungen auch Sicherheitseinrichtungen aufweisen, die wegen des meist sehr geringen zur Verfügung stehenden Raumes Konstruktion und Bau oft sehr erschweren.

Da die vornehmlich an *Zünder* zu stellenden sicherheitstechnischen und taktischen Forderungen bei den nachstehenden Betrachtungen einen weiten Raum einnehmen, seien diese vorweg kurz zusammengefaßt. Während durch die taktischen Forderungen das Verhalten der Zünder im Zielbereich bestimmt wird, betreffen die Forderungen hinsichtlich der Sicherheit – je nach Art der Zünder – die Montage, die Lagerung, die Handhabung und den Transport sowie die Lade- und Abschußphase. Zu den letztgenannten Forderungen zählen die Rohrsicherheit, die Vorrohr- oder Maskensicherheit und die Regensicherheit.

Die *Rohrsicherheit* soll gewährleisten, daß der Zünder nicht im Rohr einschließlich der Mündungsbremse ansprechen kann.

Die *Vorrohr-* oder *Maskensicherheit* soll garantieren, daß ein Zünder erst in einem bestimmten Abstand vor der Rohrmündung ansprechen kann, damit Geschütz und eigene Stellung nicht gefährdet werden.

Rohr- und Vorrohrsicherheit werden durch bestimmte Zünderelemente gesteuert, die im einzelnen unter 13.2.2, Zünderbaugruppen, genannt und beschrieben werden.

Hinsichtlich der Sicherheit, insbesondere der Transport- und Handhabungssicherheit, werden ebenso wie bei den Zündern auch an die *Anzünder* ganz bestimmte Forderungen gestellt.

Bei mechanischen Treibladungsanzündern muß beispielsweise sichergestellt sein, daß das Anzündhütchen, das bekanntlich durch Schlagenergie zur Zündung gebracht wird, ausreichend gegen ungewollte mechanische Einwirkungen, die die Zündung einleiten könnten, geschützt ist. Eine derartige Beanspruchung kann schon auftreten, wenn patronierte Munition auf unebenem, steinigem Boden abgesetzt wird.

Da bei elektrischen Treibladungsanzündern beide Anschlüsse des Zündmittels praktisch von außen frei zugänglich sind, muß die Ansprechempfindlichkeit so weit herabgesetzt werden, daß eine Zündung weder durch Kriechströme noch durch statische Aufladungen oder Beeinflussung durch hochfrequente elektrische Felder erfolgen kann. Läßt sich aus irgendwelchen Gründen die Empfindlichkeit nicht weit genug herabsetzen, so muß man durch Verwendung sog. Shorting-Clips (Kurzschlußklammern) sicherstellen, daß eine ungewollte Zündung verhindert wird.

Die an Zünder und Anzünder zu stellenden Sicherheitsforderungen sind in Form von Konstruktionsrichtlinien in der MIL-STD 1316 A und der STANAG Nr. 3525 niedergelegt. Die zum Nachweis der Erfüllung der Sicherheits- und Funktionsforderungen dienenden Prüfstands- und Beschußversuche sind in der MIL-STD 331 zusammengefaßt. Diese z. T. sehr umfangreichen Spezifikationen umfassen die gesamten Grundzüge der heutigen Zündertechnik im Hinblick auf Zündersicherheit und Zünderfunktionsprüfung.

13.2. Wirkteilzünder

Wirkteilzünder sind dazu bestimmt, den Wirkteil eines Geschosses, also den Gefechtskopf oder die Sprengladung, im Ziel bzw. im gewünschten Augenblick zu zünden.

Da es schwierig ist, die Vielzahl der Wirkteilzünder auf beschränktem Raum nach ihren spezifischen Unterschieden übersichtlich darzustellen, sei zunächst auf eine Trennung in mechanische, elektrische bzw. elektronische und pyrotechnische Zünder verzichtet. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Zündern bestehen nämlich im wesentlichen nur in der Art der *Einleitung der Zündung*; andere Baugruppen, wie z.B. die Entsicherungssysteme, sind bei allen in etwa gleich.

13.2.1. Arten von Wirkteilzündern

Nach der *örtlichen Anordnung* im Geschoß bzw. in der Rakete unterscheidet man Bodenzünder und Kopfzünder.

Vom *Wirkungsmechanismus* her gesehen gibt es Aufschlag- und Aufschlagzerlegerzünder, Zeitzünder, Annäherungszünder und Abstandszünder.

Auf die *Munitionsart* bezogen unterscheidet man Geschoßzünder, Minenzünder, Handgranatenzünder und Bombenzünder.

Neben diesen genannten typischen Zünderarten gibt es noch viele Kombinationen, die sich zwangsläufig aus den an die einzelnen Funktionen zu stellenden Forderungen ergeben.

Der klassische *Bodenzünder* hatte zur Zeit der schweren Schiffs- und Belagerungsartillerie seine besondere Bedeutung, insofern als er das Geschoß erst nach dem Durchdringen starker Panzerungen zur Detonation bringen sollte. Heute wird er eigentlich nur noch verwendet, wenn an seine Ansprechzeit – das ist die Zeit von der Zielberührung des Geschosses bis zur Initiierung der Sprengladung – keine hohen Anforderungen gestellt werden. Ferner wird er bei verhältnismäßig langsam fliegenden Geschossen und Raketen verwandt, d.h. bei Fluggeschwindigkeiten bis 300 m/s.

Der Bodenzünder reagiert nämlich erst dann, wenn ihn die nach der Zielberührung durch die Geschoßhülle laufende Stoßwelle erreicht; während dieser Zeit, die durch die Länge des Geschosses und die Schallgeschwindigkeit im Material der Geschoßhülle gegeben ist, bewegt sich das Geschoß entsprechend der Fluggeschwindigkeit weiter. Es ist daher verständlich, daß bei hohen Auftreffgeschwindigkeiten und langen Geschossen die gewünschte Wirkung im Ziel mit diesem Zündertyp im allgemeinen nicht erreicht wird, so z.B. bei Sprenggranaten beim Auftreffen und tiefen Eindringen in das Erdreich. Das gleiche gilt für Hohlladungsgeschosse, bei denen der Hohlladungsstrahl sich nicht mehr voll ausbilden kann.

Wird daher geschoßseitig eine Initiierung der Sprengladung vom Boden her und gleichzeitig eine sehr kurze Ansprechzeit (wenige Mikrosekunden) verlangt, z.B. bei HL-Geschossen, so wird man immer einen elektrischen Bodenzünder verwenden und eine Energiequelle oder ein Schaltglied in der Spitze des Geschosses anordnen, die den Bodenzünder über einen isolierten Leiter elektrisch zünden (s. Bilder 1312 und 1321).

Wenn dagegen auf die Forderung einer Initiierung vom Boden her verzichtet werden kann, werden Kopfzünder verwandt.

Kopfzünder haben gegenüber den Bodenzündern folgende Vorteile:

Zum einen kann der Einbau der Zünder erst kurz vor dem Schuß erfolgen. Diese Möglichkeit ist für Bodenzünder bei nicht patronierter Munition nur bedingt gegeben; bei patronierter Munition entfällt sie völlig. Der Einbau des Zünders kurz vor dem Schuß ermöglicht eine getrennte Lagerung von Zünder und Geschoß, was aus Gründen der Sicherheit von großer Bedeutung sein kann.

Zum anderen haben Kopfzünder den Vorteil, daß kurz vor dem Schuß noch Einstellungen, wie z. B. die Einschaltung einer Zündverzögerung bei Aufschlagzündern oder die Einstellung der Laufzeit von mechanischen Zeitzündern, möglich sind. Ferner lassen sich bei Kopfzündern zusätzliche Sicherungen (sog. Vorstecker) noch kurz vor dem Laden auf einfache Weise entfernen.

Ein möglicher Nachteil dieser Art Sicherungen kann jedoch darin gesehen werden, daß es nicht auszuschließen ist, daß das Entfernen der Sicherungen vor dem Schuß vergessen wird.

Aufschlagzünder zünden, wie der Name sagt, beim Aufschlagen des Geschosses auf das Ziel.

Eine Variante des Aufschlagzünders ist der *Aufschlagzerlegerzünder.* Er hat die Eigenschaft, die Zündung mittels eines besonderen Schaltgliedes (s. Bild 1315) nach einer gewissen Flugzeit einzuleiten, sofern bis zu diesem Zeitpunkt keine Aufschlagzündung erfolgt ist.

Eine praktische Anwendung findet dieser Wirkungsmechanismus beispielsweise beim Beschuß fliegender Ziele (Luftabwehr); verfehlt das Geschoß sein Ziel, so tritt nach Ablauf der Zerlegerzeit die Zerlegereinrichtung in Funktion und leitet in der Luft die Zündung des Geschosses ein. Ohne diese Selbstzerlegung würde das Geschoß erst beim Auftreffen auf dem Boden detonieren und dabei unter Umständen unbeabsichtigt Schaden anrichten.

Der *Zeitzünder* leitet nach einer bestimmten Flugzeit, die meistens vor dem Laden eingestellt werden kann, die Zündung ein. Zeitzünder arbeiten sowohl auf mechanischer als auch auf elektronischer Basis.

Die ausschließlich elektronischen *Annäherungszünder* arbeiten aktiv oder passiv.

Aktive Zünder werden durch einen Effekt ausgelöst, den der Zünder verursacht, z. B. elektromagnetische Wellen, die vom Zünder erzeugt und abgestrahlt und vom Ziel reflektiert werden. Hier kam bis in die jüngste Zeit fast ausschließlich das Doppler-Prinzip zur Anwendung, bei dem nach Überschreiten einer Intensitätsschwelle für das reflektierte Signal die Zündung eingeleitet wird. Heute arbeitet man weitgehend nur noch mit dem Prinzip der Laufzeitauswertung des abgestrahlten Signals, wodurch man unabhängig vom oft sehr unterschiedlichen Reflexionsverhalten der Zielfläche wird.

Annäherungszünder setzt man vornehmlich gegen Flugziele ein. Dabei spielt eine Variante des Annäherungszünders, der „Vorbeiflugzünder", eine besondere Rolle in der Tieffliegerabwehr. Dieser Zünder wird aufgrund der besonderen Richt-Charakteristik seiner Antenne im optimalen Vorbeiflugpunkt gezündet, wobei einer zusätzlichen Aufschlagzünd-

einrichtung für den Fall des direkten Treffens in jedem Fall der Vorrang der Zündeinleitung eingeräumt ist.

Eine weitere Sonderform des Annäherungszünders stellt der elektronische *Abstandszünder* gegen Bodenziele dar (Bodenabstandszünder). Er arbeitet ebenfalls vorzugsweise nach dem Prinzip der Signallaufzeit-Auswertung und ist dadurch weitgehend unabhängig vom Fallwinkel des Geschosses und vom Reflexionsverhalten des Zielgebietes. Der (Boden-) Abstandszünder zündet, wenn ein bestimmter, für die Wirkung optimaler Abstand zwischen Ziel und Geschoß erreicht ist.

Mechanische Abstandszünder, wie sie früher vorzugsweise bei Bomben in Form eines teleskopartig ausfahrbaren, den Zündabstand darstellenden Stabes angewendet wurden, sind heute nicht mehr im Einsatz.

Passive elektronische Annäherungszünder reagieren auf einen Effekt, der vom Zielobjekt selbst erzeugt wird, wie z. B. die Infrarotabstrahlung von Wärmequellen oder auch die von Geräuschquellen ausgehenden Schallwellen.

Sowohl bei Zeit- als auch bei Annäherungs- und Abstandszündern werden oftmals zusätzlich Aufschlag-Zündsysteme eingebaut, damit der Zünder bei etwaiger Zielverfehlung durch den folgenden Aufschlag auf den Boden anspricht und das Geschoß zerlegt.

Die im Rahmen dieser Aufzählung ebenfalls zu den Wirkteilzündern zu rechnenden *Minenzünder* werden allgemein in Land- und Seeminenzünder unterteilt.

Landminen sind zum überwiegenden Teil Panzerminen, zum geringeren Teil Schützenminen. Sie werden wenige Zentimeter unter der Erdoberfläche verlegt; ihre Zünder sollen z.B. durch den Druck des über sie hinwegrollenden Fahrzeuges ausgelöst werden. Eine der an sie zu stellenden Forderungen ist die nach der Sicherheit gegen Detonationsschocks, da es nicht wünschenswert ist, wenn Minenfelder durch Beschuß geräumt werden können. Weiterhin wird für die Minenzünder (wie auch für die Minen selbst) gefordert, daß sie möglichst keine Metalle enthalten, da Minensuchgeräte auf Metalle reagieren. Ferner wird in den meisten Fällen gewünscht, daß die Minenzünder eine sog. Wiederaufhebsicherung besitzen, damit eine aufgespürte Mine nicht durch einfaches Aufheben entschärft oder entfernt werden kann; im Augenblick des versuchten Aufhebens muß vielmehr ein Schaltglied in Funktion treten, das die Mine zur Detonation bringt.

Die *Seeminenzünder* dienen dazu, Seeminen im Augenblick der größten Wirkungsmöglichkeit zu zünden, nämlich dann, wenn Schiffe die Minen berühren oder sich ihnen so weit genähert haben, daß das Zünden als wünschenswert erscheint. Den Seeminenzündern liegen die verschiedensten Konstruktionsprinzipien zugrunde; als Beispiele seien hier nur chemische, akustische und magnetische Zünder genannt.

Bei *Handgranatenzündern* (s. unter 13.2.3) wird der gewünschte Zeitpunkt der Zündung vom Werfer bestimmt. Im allgemeinen wird vor dem Wurf die Transportsicherung gelöst, danach spricht der Zünder je nach Konstruktionsprinzip nach einer gewissen Zeit (evtl. noch auf der Flugbahn) oder beim Aufschlag der Handgranate an. Im Notfall, z.B. bei unbeabsichtigtem Fallenlassen der Handgranate nach dem Entsichern, soll der Zünder überhaupt nicht oder erst nach einer gewissen Zeit ansprechen, in der der Werfer sich in Sicherheit bringen kann.

Bombenzünder können ebenso wie Artilleriezünder in Aufschlag-, Zeit- und Annäherungszünder aufgegliedert werden. Es besteht im Prinzip kein Unterschied zwischen Artillerie- und Bombenzündern; lediglich die Konstruktionsmerkmale der Zünderbaugruppen können verschieden sein, da auch der Bombenzünder den speziellen Forderungen des Wirkteils angepaßt werden muß. Vielfach werden Bomben wegen des ausreichend zur Verfügung stehenden Raumes für Zünder mit mehreren Zündern der gleichen oder verschiedener Wirkungsmechanismen ausgerüstet.

Eine an dieser Stelle erwähnenswerte Variante des Annäherungszünders bei Bomben ist der sog. barometrische Zünder. Dies ist ein luftdruckabhängiger Zünder, der in einer bestimmten Höhe über dem Zielgebiet, d.h. bei Erreichen des dort herrschenden Luftdrucks anspricht. Die Einstellung auf diesen Luftdruck erfolgt vor dem Abwurf der Bombe von außen am Zünder. Barometrische Zünder werden u.a. bei Leuchtbomben und Luftminen angewandt.

13.2.2. Zünderbaugruppen

Die Entwicklung eines Zünders entsprechend der an ihn gestellten Forderungen führt zwangsläufig zu verschiedenen typischen Baugruppen, die bei den meisten Zündern in verschiedenen Abwandlungen wiederkehren.

Die wesentlichen dieser nachstehend im einzelnen behandelten Baugruppen sind die Energiequellen, die Energiespeicher, Einrichtungen zur Erzielung von Rohr- und Vorrohrsicherheit, die Detonatorsicherungen sowie Schaltglieder zur Einleitung der Zündung. Abschließend werden noch die Zündmittel und die Zündkette behandelt.

13.2.2.1. Energiequellen und Energiespeicher

Die *Energiequellen* werden in zwei Hauptgruppen unterteilt, und zwar in solche, die lediglich die zum Zünden benötigte Energie liefern, und in solche, die darüber hinaus noch Energie für die Steuer- und Regelorgane elektronischer Zünder liefern.

Innerhalb der ersten Gruppe zählt der Induktions- oder Impulsgenerator mit zu den ältesten und bekanntesten erprobten Energiequellen, die auch nach langjähriger Lagerung keine nennenswerten Alterungserscheinungen zeigen.

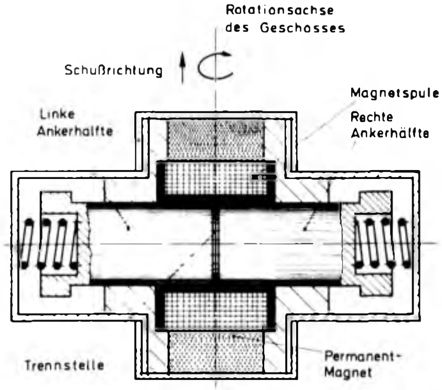


Bild 1301. *Rotationsabhängiger Induktionsgenerator.*

In Bild 1301 ist ein derartiger Generator dargestellt, bei dem durch die Rotation um die Geschoßachse infolge der Fliehkraft nach Erreichen einer bestimmten Drehzahl der Magnetkreis an der Trennstelle geöffnet und dadurch ein elektrischer Impuls erzeugt wird.

Durch einseitig wirkende Kräfte (Schlag, Fall oder Stoß) ist eine Auslösung nicht möglich, da hierbei die beiden Ankerhälften als eine Einheit im Magnetkreis verschoben werden, ohne diesen zu öffnen.

Bild 1302 stellt einen Generator dar, der im Gegensatz zum vorgenannten nicht bei einer bestimmten Drehzahl, sondern bei einer bestimmten Beschleunigung einen elektrischen Impuls erzeugt. Bei Erreichen einer genau bemessenen Beschleunigung wird die Scherplatte infolge des Beharrungsvermögens der beiden Ankerteile durch den als Ringschneide ausgebildeten unteren Ankerteil abgeschert. Oberer und unterer Ankerteil bewegen sich dann zunächst gemeinsam entgegen der Beschleunigungsrichtung, bis nach Durchlaufen der Strecke a der obere Ankerteil durch seine Platte auf dem oberen Polschuh festgehalten wird; dann bewegt sich allein der untere Ankerteil weiter und öffnet dadurch den Magnetkreis an der Trennstelle.

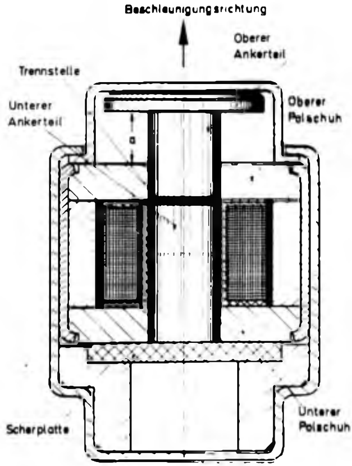


Bild 1302. *Beschleunigungsabhängiger Induktionsgenerator.*

Weitere bekannte Energiequellen dieser Art stellen piezoelektrische Stoffe dar, die unter mechanischem Druck direkt elektrische Spannungen erzeugen. Am häufigsten werden im Zünderbau heute die Erdalkalititanate, z. B. Blei-Zirkonat-Titanat, verwendet, welche die piezoelektrischen Kristalle früherer Jahre abgelöst haben. Die Piezoelemente sind so aufgebaut und geschaltet, daß sie als Kondensatoren aufgefaßt werden können, die sich unter mechanischem Druck aufladen.

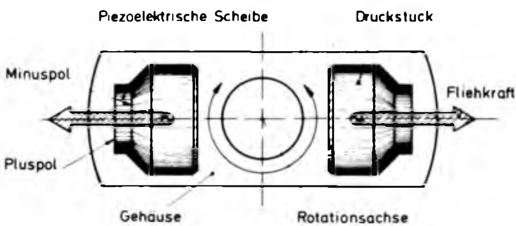


Bild 1303. *Rotationsabhängiger piezoelektrischer Generator.*

In Bild 1303 ist ein Generator dargestellt, in dem bei der Rotation um die Geschoßachse zwei Druckstücke infolge der Fliehkraft auf die

piezoelektrischen Elemente drücken und damit die gewünschte Spannung erzeugen. Diese Spannung bleibt so lange erhalten, wie die Kraft auf die Piezoelemente einwirkt; dadurch steht die erzeugte Energie ohne zusätzliche Speicherglieder auf der gesamten Flugbahn zur Zündung zur Verfügung.

Ein weiterer Anwendungsfall ist in Bild 1304 dargestellt. Es zeigt die wohl gebräuchlichste Anwendungsform, bei der der piezoelektrische Generator in der Spitze des Geschosses angeordnet ist. Die Zündenergie wird bei der Zielberührung erzeugt, nachdem eine Stoßfront mit ausreichender Amplitude das piezoelektrische Element durchlaufen hat.

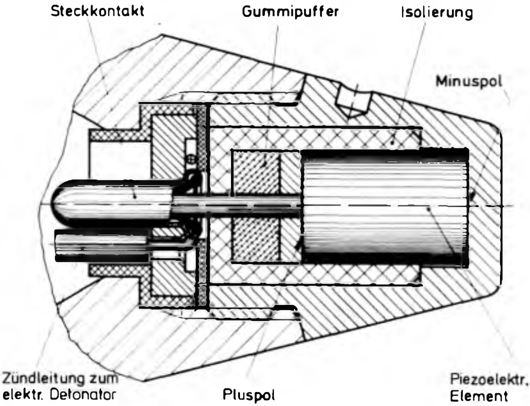


Bild 1304. *Piezoelektrischer Aufschlaggenerator.*

Weiterhin ist die Verwendung dieser Energiequelle in Bodenzündern bekannt, bei denen ein Schlagstück beim Auftreffen des Geschosses auf ein Ziel die zur Energieerzeugung erforderliche Kraft infolge seiner Trägheitswirkung aufbringt.

Zu der Gruppe der Energiequellen, die neben der Zündenergie auch noch Energie für Steuer- und Regelorgane liefern sollen, gehören im wesentlichen die rotierenden elektromagnetischen Generatoren sowie Batterien. Erstere sind allerdings, sofern sie durch den Luftstrom auf der Flugbahn angetrieben werden, infolge notwendiger Öffnungen oder herausragender Teile (Turbinenräder) gegenüber Umweltbeanspruchungen empfindlich. Daher werden in den meisten Fällen, besonders bei elektronischen Zündern, Batterien verwendet, die kurz vor dem Einsatz aktiviert werden. Diese Aktivierung erfolgt entweder unmittelbar vor dem Abschuß durch von außen zugeführte elektrische Signale oder während der Abschußphase durch Trägheitskräfte.

In neuerer Zeit finden auch Feststoff- Elektrolytbatterien Eingang in die Zündertechnik. Diese zeichnen sich dadurch aus, daß sie infolge ihres völlig massiven Aufbaus für besonders hohe mechanische Belastungen geeignet sind. Darüber hinaus behalten sie auch bei wechselnden Umweltbedingungen fast ihre gesamte Energie über einen Zeitraum von mindestens 10 Jahren bei. Der Energieinhalt, bezogen auf das Zellenvolumen, beträgt bei diesen Batterien etwa die Hälfte dessen der bekannten Nickel-Kadmium-Zellen.

Als *Energiespeicher* werden in elektrischen Zündern fast ausschließlich Kondensatoren verwendet.

Bei mechanischen Zündern benutzt man als Energiespeicher Federn, die entweder bei der Montage in vorgespanntem Zustand eingebaut werden (vgl. Bild 1315) oder die erst während der Abschußphase ihre Vorspannung durch einwirkende Trägheitskräfte erhalten.

13.2.2.2. **Sicherungssysteme**

Für die Zünderbaugruppe *Rohr- und Vorrohrsicherheit* stellt Bild 1305 ein typisches Beispiel für drallstabilisierte Geschosse dar. Es handelt sich um eine Kette von Verriegelungsklappen, die sich aufgrund ihrer geometrischen Form gegenseitig verriegeln, mit Ausnahme der Klappe I.

Die Klappe I wird nach dem Abschuß entriegelt und schwenkt infolge der Zentrifugalkraft aus ihrer Ruhelage heraus. Sie gibt damit die Klappe II frei, die ihrerseits wieder die nachfolgende entriegelt. Nach Ausschwenken der letzten Klappe ist das Zündsystem entsichert. Durch diese Kopplung der einzelnen Klappen miteinander vergeht somit vom Beginn der Beschleunigungsphase (Freigabe der ersten Klappe) bis zur vollen Entsicherung eine gewisse Zeit, die gleichzeitig neben der absoluten Rohrsicherheit auch eine bestimmte Vorrohrsicherheit ergibt.

Das Gegenstück zu dieser drallabhängigen Klappensicherung stellt die in Bild 1305a gezeigte Drehscheibensicherung für flügelstabilisierte Geschosse dar.

Hier ist eine Reihe von einzeln oder kollektiv über Drehfedern angetriebenen Scheiben 1 bis 5 mit einer einseitig konvexen Ausnehmung so angeordnet, daß alle bis zur Freigabe der Scheibe 1 gegenseitig blockiert sind und die Entriegelung nur nacheinander erfolgen kann. Die Entriegelungsrichtung der einzelnen Scheiben ist im Bild durch Pfeile gekennzeichnet. Wegen der größeren Drehwinkel bis zur Freigabe der jeweils nächsten Drehscheibe werden bei dieser Sicherung gegenüber der Klappensicherung wesentlich längere Vorrohrsicherheitszeiten erreicht.

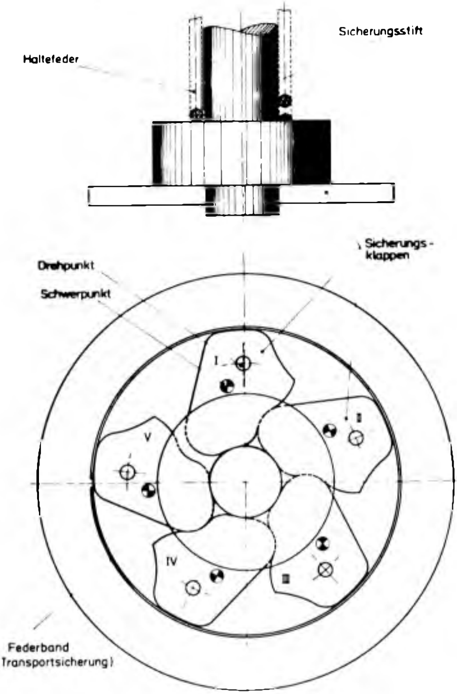


Bild 1305. *Klappensicherungssystem.*

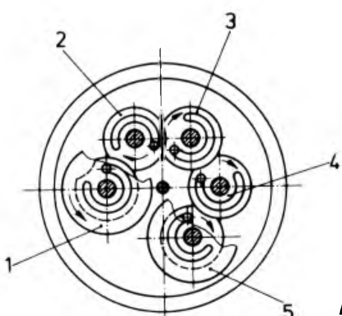


Bild 1305a. *Drehscheibensicherung.*

Eine andere Rohr- und Vorrohrsicherung für drallstabilisierte Geschosse ist in Bild 1306 dargestellt.

Auf einem ringförmigen, drehbaren Wickelträger ist ein Band aus einer dünnen Folie so aufgewickelt, daß ein Sicherungsstift gesperrt wird. Nach dem Abschuß wandert unter Einwirkung der Fliehkraft das freihängende Stück der äußeren Windung nach außen und legt sich am Gehäuse an; ihm folgen nacheinander die jeweils freihängenden nächsten Gänge des Wickels, bis – nachdem das Geschoß einen genügend großen Sicherheitsweg vor der Mündung zurückgelegt hat – der gesamte Wickel am Gehäuse anliegt und den Sicherungsstift freigibt.

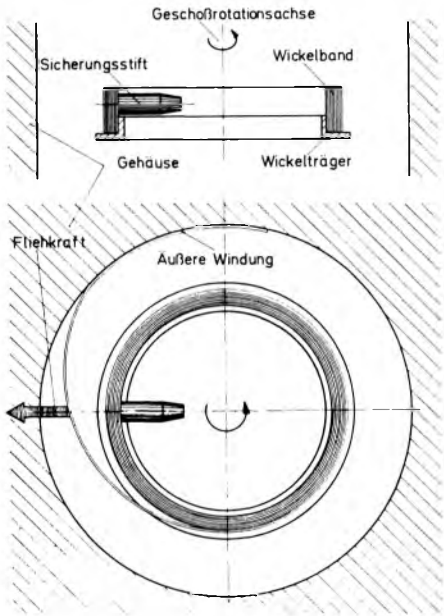


Bild 1306. *Wickelbandsicherung.*

Bild 1307 zeigt ein Sicherungssystem, das sowohl bei drall- als auch bei flügelstabilisierten Geschossen sehr weite Verbreitung gefunden hat. Dieses „Rückschießbolzensystem" ist dadurch besonders bemerkenswert, daß zu seiner Entriegelung nicht nur eine gewisse Beschleunigungskraft, sondern auch eine bestimmte Impulsdauer erforderlich ist.

Durch die beim Abschuß auftretende Beschleunigung bewegt sich der Stift a entgegen der Flugrichtung; daraufhin wird die Kugel b durch den Konus des Stiftes c aus ihrer Verriegelungslage herausgedrückt; Stift c wird dadurch entriegelt und bewegt sich nun ebenfalls infolge der während des Rohrdurchlaufs noch bestehenden Beschleunigung des Geschosses entgegen der Flugrichtung nach hinten. Dadurch wird am Ende der Stift zur Detonatorsicherung freigegeben.

Durch die zeitliche Abhängigkeit der einzelnen Bewegungsvorgänge voneinander ist eine bestimmte Dauer der Beschleunigung erforderlich, um das nachgeschaltete Sicherungssystem zu entriegeln. Bei kurzzeitiger Schockbeanspruchung (Fall oder Stoß) reicht die Dauer der auf das Verriegelungssystem einwirkenden Beschleunigung lediglich dazu, den Stift a um einen bestimmten Betrag durchschwingen zu lassen, ohne daß diese Beschleunigungsdauer ausreicht, auch den Stift c in Bewegung zu setzen.

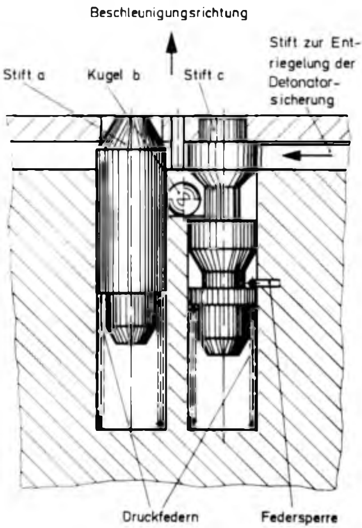


Bild 1307. *Beschleunigungsabhängige Sicherung.*

Da durch dieses System nur die Schocksicherheit gewährleistet wird, ist ein weiteres nachgeschaltetes mechanisches Element (Zeitglied) erforderlich, um auch die Rohr- und Vorrohrsicherheit zu erzielen.

Ein Beispiel für ein solches Zeitglied ist in Bild 1308 gezeigt; diese Hemmwerksicherung ist in dieser oder in abgewandelter Form von mechanischen Uhrwerken her bekannt, so daß auf eine Beschreibung verzichtet werden kann.

Eine *Detonatorsicherung* wird heute für sämtliche Zünder gefordert. Sie soll verhindern, daß bei unbeabsichtigtem Zünden des Detonators durch Schock oder übermäßige Erwärmung während des Transports, der Lagerung oder der Abschußphase die Übertragungsladung und damit der Sprengstoff initiiert wird. Frühestens nach Beendigung der Abschußphase darf der Detonator in die Zündstellung schwenken und damit ein Zünden der Sprengladung ermöglichen.

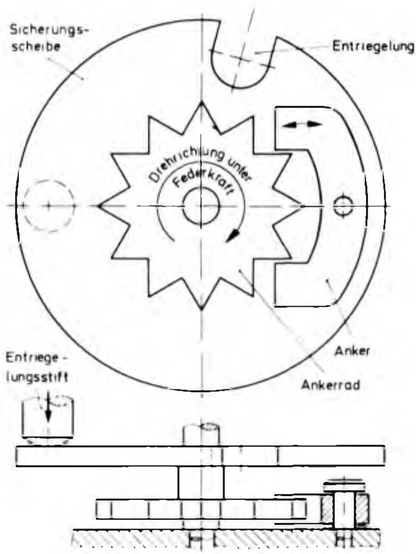


Bild 1308. *Hemmwerksicherung.*

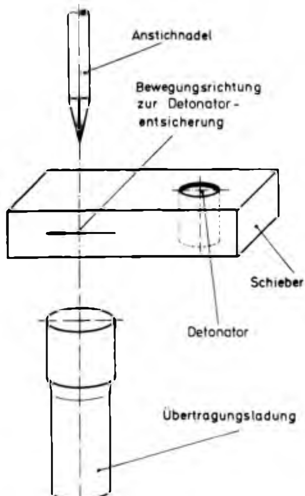
Um dies zu erreichen, ist eine Kopplung mit den Elementen der Rohrsicherheit erforderlich. Weiterhin wird angestrebt, daß die Detonatorsicherung nach Möglichkeit zusätzlich mit den Einrichtungen der Vorrohrsicherheit gekoppelt wird, um das Einschwenken in die Zündstellung erst nach Beendigung der Vorrohrsicherheit zu ermöglichen.

In den Bildern 1309 und 1310 sind zwei Arten von Detonatorsicherungen schematisch dargestellt, eine Schiebersicherung und eine Rotorsicherung.

Bei der Schiebersicherung (Bild 1309) liegt der Detonator in der Sicherstellung außerhalb der Achse Anstichnadel – Übertragungsladung; erst auf der Flugbahn wird sie durch die Zentrifugalkraft oder durch Federn in die Zündstellung gebracht.

Bei der Rotorsicherung (Bild 1310) liegt in der „Ruhestellung" des Rotors der Detonator annähernd quer zur Bewegungsrichtung der Anstichnadel; erst nach dem Einschwenken des Rotors in die „Scharfstellung" infolge Federkraft bei flügelstabilisierten Geschossen oder der Zentrifugalkraft bei drallstabilisierten Geschossen wird die Funktionskette Anstichnadel – Detonator – Übertragungskapsel hergestellt.

Bild 1309. *Schiebersicherung.*



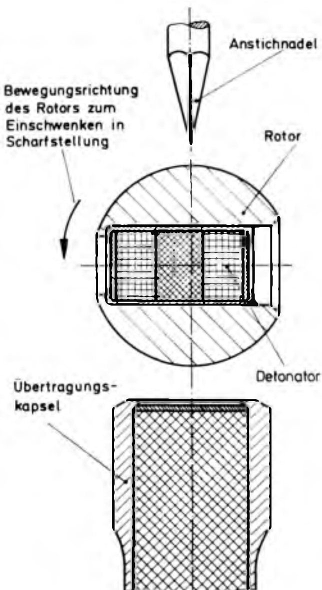


Bild 1310. *Rotorsicherung.*

Das Beispiel einer Detonatorsicherung mit zusätzlichen Elementen der Rohr- und Vorrohrsicherheit zeigt Bild 1311. Darin ist die Rotorausführung der Detonatorsicherung nach Bild 1310 mit der Wickelbandsicherung nach Bild 1306 kombiniert. Erst nach Beendigung der Vorrohrsicherheit gibt der Sicherungsstift den Rotor zum Einschwenken in die Zündstellung frei. Man spricht daher von einem „gesteuerten Rotor".

Weitere Ausführungen von Detonatorsicherungen werden im Abschnitt 13.2.3, Konstruktionsbeispiele, behandelt.

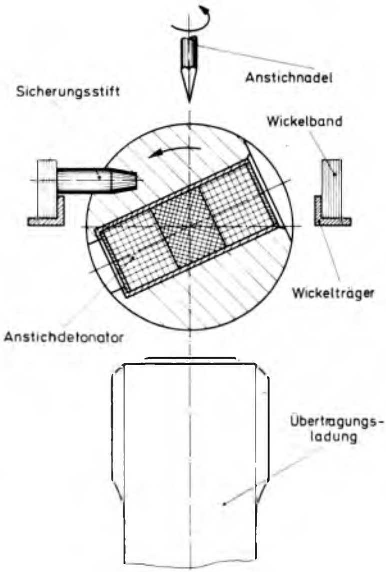


Bild 1311. *Kombinierte Detonator-, Rohr- und Vorrohrsicherung.*

13.2.2.3. Schaltglieder

Nachdem — allgemein — der Detonator in die Zündstellung eingeschwenkt ist, kann die Zündung zum gewollten Zeitpunkt eingeleitet werden. Hierzu bedarf es besonderer Schaltglieder.

Zu den elektrischen Schaltgliedern zählt man z. B. die als Doppelhaube ausgebildete Geschoßspitze (Bild 1312). Unter der Geschoßhaube ist

eine zweite Haube isoliert angeordnet, die mit dem Zünder leitend verbunden ist. Bei Zielberührung wird die Außenhaube deformiert und schließt bei der Berührung mit der Innenhaube den Zündkreis. Die Haube kann so ausgebildet werden, daß die Zündung selbst bei geringstem Auftreffwinkel noch eingeleitet wird.

Diese Anordnung wird vorwiegend dann angewandt, wenn eine extrem kurze Zeit zwischen der Zielberührung und dem Ansprechen des Zünders gefordert wird (z.B. bei HL-Geschossen).

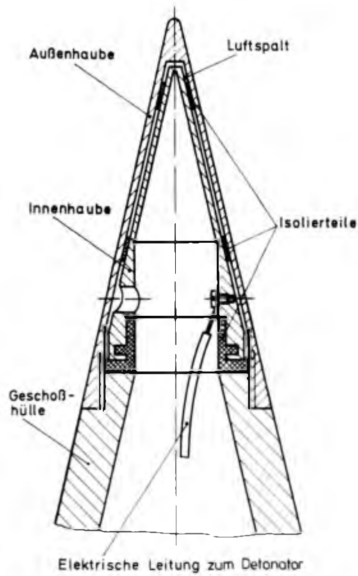


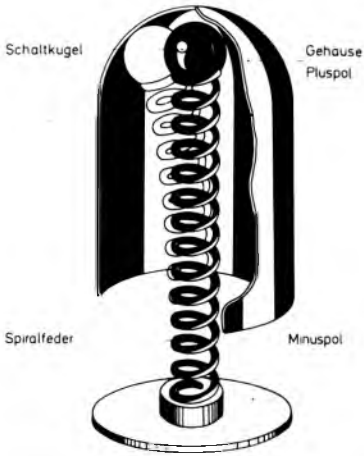
Bild 1312. *Geschoßdoppelhaube.*

Schaltglieder, die in Zünder eingebaut werden, sind Vibrations- und Beschleunigungsschalter.

In Bild 1313 ist ein solcher Schalter dargestellt; er ist hauptsächlich für Bomben- und Minenzünder geeignet.

Wenn der an der Spitze einer Spiralfeder angebrachten Kugel durch äußere Einflüsse (Stoß usw.) eine Kraftkomponente in einer der

Bild 1313. *Kugelkontakt.*



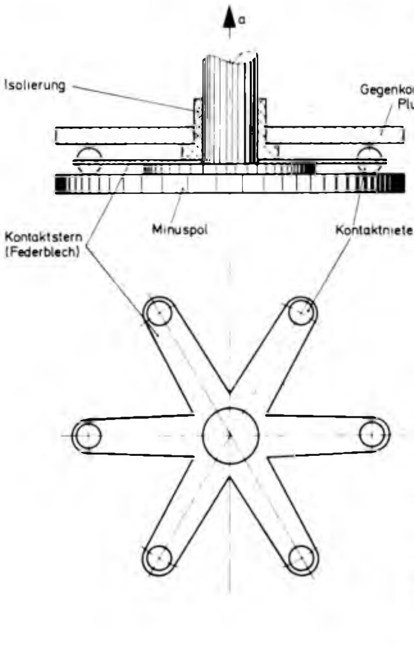


Bild 1314. *Kontaktstern.*

möglichen Bewegungsrichtungen derart erteilt wird, daß sie den Gegenkontakt (das Gehäuse) berührt, wird der Zündkreis geschlossen und die Zündung eingeleitet.

Ein weiteres Schaltglied zeigt Bild 1314. Ein Kontaktstern aus federndem Material ist so zu einem Gegenkontakt angeordnet, daß seine Kontaktnieten bei plötzlicher Verzögerung des Geschosses, also bei Zielberührung, in der Richtung a ausschwenken und den Zündkreis schließen. Aber auch bei plötzlicher Änderung der Flugbahn, z.B. bei Abprallern, kommt es zur Berührung zwischen den Kontaktnieten und dem Gegenkontakt, und zwar deshalb, weil der Kontaktstern infolge seines ihm vom Drall aufgezwungenen Beharrungsvermögens bestrebt ist, seine Lage im Raum entgegen der Verschwenkung seiner Lagerung im Zünder beizubehalten.

Weitere Schaltglieder sind die Anstichnadel (Zündnadel) und die Zerlegereinrichtungen bei mechanischen Zündern.

Bei direktem Beschuß harter Ziele wird die Anstichnadel durch die Deformation der Geschoßhaube in den Detonator gedrückt, bei weichen Zielen durch das Eindringen von Zielmaterial in den Zünder.

Wie bereits ausgeführt, hat eine *Selbstzerlegereinrichtung* die Aufgabe, die Zündung nach einer gewissen Flugzeit einzuleiten, sofern bis dahin keine Aufschlagzündung erfolgt ist. Da im Selbstzerlegerfall bei mechanischen Zündern der Aufschlagimpuls fehlt, muß das Anstechen des Detonators zum gewünschten Zeitpunkt durch eine Druckfeder bewirkt werden, die als Energiespeicher unter Vorspannung in dem Zünder eingebaut ist.

Durch die Zerlegereinrichtung wird lediglich der Zeitpunkt der Selbstzerlegung bestimmt.

Die hier betrachtete Zerlegereinrichtung (Bild 1315) besteht im wesentlichen aus der Druckfeder, dem Kugelträger mit den Zerlegerkugeln und der zur Zünderachse geneigten Lauffläche der Kugeln.

Im Ruhezustand stützt sich der Kugelträger über die Zündnadel auf den Rotor ab. Bei der Rotation des Geschosses werden die Zerlegerkugeln infolge der Fliehkraft gegen ihre konische Lauffläche gedrückt und erzeugen entsprechend der Neigung dieser Lauffläche eine auf die Zündnadel in axialer Richtung wirkende Kraftkomponente, die der Druckfederkraft entgegenwirkt.

Die Kräfte sind so aufeinander abgestimmt, daß, nachdem das Geschoß das Rohr verlassen hat, die von den Kugeln erzeugte Kraftkomponente größer ist als die Kraft der vorgespannten Feder, so daß sich der Kugelträger mit der Zündnadel vom Rotor abhebt. Letzterer kann jetzt in die Zündstellung schwenken, und wenn das Geschoß nun auf ein Ziel trifft, kann der Detonator durch die Zündnadel gezündet werden.

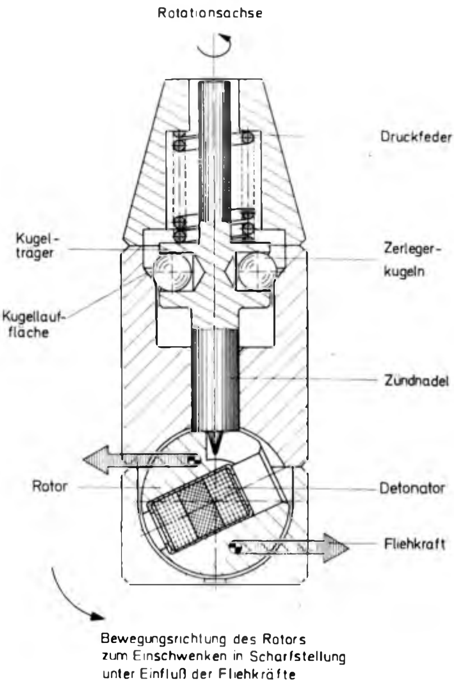


Bild 1315. *Selbstzerlegereinrichtung.*

Fliegt das Geschoß am Ziel vorbei, so wird mit abnehmender Geschoßdrehzahl die von den Kugeln erzeugte Kraftkomponente ständig kleiner, bis schließlich die Federkraft überwiegt. In diesem Augenblick hat das Geschoß die sog. Zerlegerdrehzahl erreicht. Jetzt werden die im Kugelträger liegenden Kugeln von der konischen Lauffläche heruntergedrückt, so daß keine Kraftkomponente mehr der Druckfeder entgegenwirkt und diese nunmehr die in ihr gespeicherte Energie als Anstichenergie über die Zündnadel freigeben kann.

13.2.2.4. **Zündmittel**

Dem eigentlichen Zünder nachgeschaltet sind die *Zündmittel (Detonatoren)*. Sie werden von den vorstehend behandelten Schaltgliedern mit Energie beaufschlagt. Ebenso wie bei den Zündern unterscheidet man bei den Detonatoren zwischen mechanischen und elektrischen.

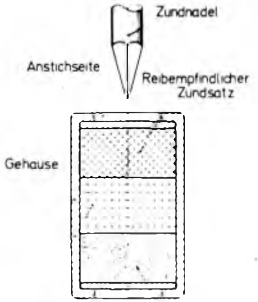


Bild 1316. *Anstichdetonator.*

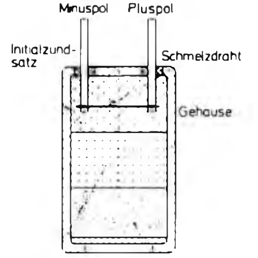


Bild 1317. *Elektrischer Detonator.*

Der *mechanische Detonator* (Bild 1316) besteht im wesentlichen aus einem reibempfindlichen Zündsatz, der durch das Eindringen der Anstichnadel (Zündnadel) zur Reaktion (Zündung) gebracht wird. Hinter dem reibempfindlichen Primärzündsatz sind noch ein oder mehrere andere Initialzündmittel als Sekundärzündsatz zur Verstärkung eingepreßt (z. B. Bleiazid, Nitropenta, Oktogen).

Bei *elektrischen Detonatoren* wird die Zündung elektrisch eingeleitet. Sie erfolgt entweder durch einen zum Glühen und Schmelzen gebrachten Draht, durch Verdampfen einer Metallschicht an einer Funkenstelle oder durch Stromdurchgang durch einen elektrisch leitfähigen Initialzündsatz.

Wie bei den mechanischen Detonatoren sind auch hier zusätzliche Initialzündsätze zur Verstärkung nachgeschaltet.

Bild 1317 zeigt die Ausführung eines elektrischen Detonators mit Glühdraht (Schmelzdraht).

Bei der Auswahl der Detonatoren sind neben verschiedenen anderen Faktoren die Ansprechempfindlichkeit und die Umsetzungszeit entscheidend. Da die bei elektrischen Zündern zur Verfügung stehende Energie in der Regel klein ist, muß man entsprechend empfindliche Detonatoren wählen.

Durch die an die Zünder gestellten taktischen Forderungen wird die maximal zulässige Umsetzungszeit (Anzündzeit) bestimmt. Sie ist abhängig vom Aufbau der Zünder und der in der Zeiteinheit zugeführten Energie.

Bild 1318 zeigt die Abhängigkeit der Umsetzungszeit von der zugeführten Energie. Daraus ist ersichtlich, daß eine Mindestenergiezufuhr notwendig ist, um kleine, konstante Umsetzungszeiten zu erhalten, und daß durch weitere Energiezufuhr von einem bestimmten Punkt A an keine weitere Verringerung der Umsetzungszeit mehr möglich ist.

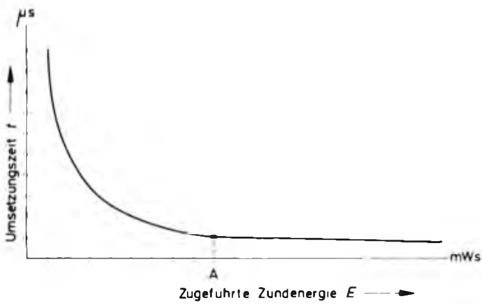


Bild 1318. *Abhängigkeit der Umsetzungszeit von der zugeführten Energie: t = f(E).*

Die Detonatoren für Wirkteilzünder sind in ihren Abmessungen normalerweise sehr klein gehalten, und zwar hauptsächlich aus zwei Gründen: einmal, um das Volumen der geforderten Detonatorsicherung klein zu halten, zum anderen, um die Menge an hochempfindlichem Initialsprengstoff wegen der Transport-, Handhabungs- und Lagersicherheit möglichst gering zu halten.

Zum Zünden von Sprengstoffen ist aber meistens eine größere Energie erforderlich, als der Detonator sie liefert, so daß zwischen Detonator und Sprengladung noch entsprechende Übertragungs- und Verstärkerladungen angeordnet werden müssen. Eine derartige, als *Zündkette* bezeichnete Anordnung, ist in Bild 1319 dargestellt.

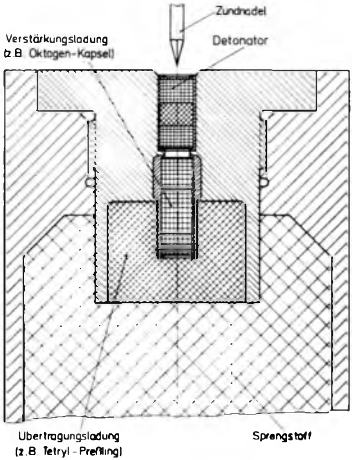


Bild 1319. *Zündkette (Prinzipdarstellung ohne Detonatorsicherung).*

13.2.3. Konstruktionsbeispiele

Zur Abrundung und Ergänzung des vorstehend unter „Zünderbaugruppen" gegebenen Überblicks über die wesentlichen Bestandteile eines Wirkteilzünders werden nachstehend einige Konstruktionsbeispiele aus der Praxis gebracht.

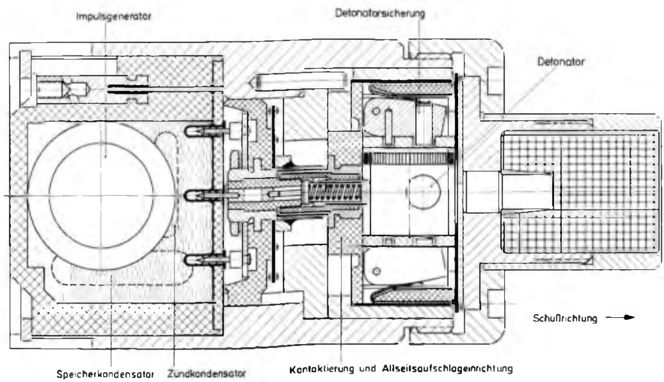


Bild 1320. *Impulsgenerator-HL-Zünder mit Detonatorsicherung.*

In Bild 1320 ist ein im Boden von Hohlladungsgeschossen anzuordnender elektrischer Impulsgenerator-Hohlladungszünder mit einer Detonatorsicherung dargestellt. Als Schaltglied dient eine Geschoßdoppelhaube (vgl. Bild 1312). Die zur Zündung erforderliche elektrische Energie wird durch einen rotationsabhängigen Impulsgenerator (vgl. Bild 1301) erzeugt und in einem Kondensator gespeichert. Die elektrische Vorrohrsicherheit wird durch eine verzögerte Umladung der elektrischen Energie auf den eigentlichen Zündkondensator erreicht.

Nach Beendigung der Beschleunigungsphase wird der Rotor mit dem Detonator freigegeben und durch einen geeigneten Antrieb (z. B. eine Drehfeder) in Verbindung mit einer Hemmeinrichtung einige Meter vor der Rohrmündung in die Zündstellung geschwenkt. Nach Ablauf dieser mechanischen Vorrohrsicherheit ist der Zünder allerdings erst dann voll funktionsfähig, wenn auch die Energie im Zündkondensator den zur Zündung des Detonators erforderlichen Wert erreicht hat.

Beim direkten Auftreffen des Geschosses auf ein Ziel wird der Zündkreis über die Doppelhaube geschlossen; streift dagegen das Geschoß das Ziel nur, ohne es mit der Spitze zu berühren, so kommt die zusätzlich eingebaute „Allseits"-Aufschlageinrichtung (vgl. Bild 1314) zur Wirkung, die der Doppelhaube parallel geschaltet ist.

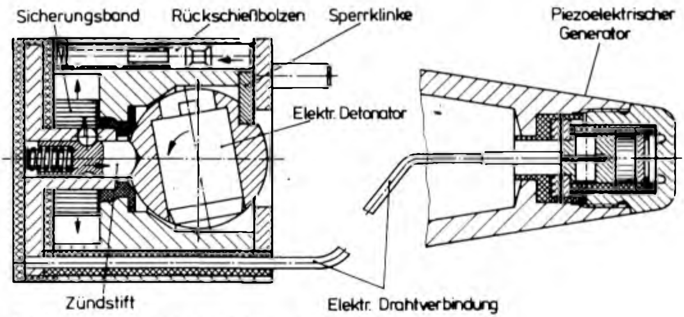


Bild 1321. *Piezoelektrischer Aufschlagzünder.*

Bild 1321 zeigt ebenfalls einen elektrischen Zünder, bei dem die Detonatorsicherung im Boden des Geschosses angeordnet wird. Abweichend vom vorigen Beispiel ist im wesentlichen die in der Geschoßspitze angeordnete Energiequelle (piezoelektrischer Aufschlaggenerator; s. Bild 1304).

Dieser Zünder wird vorzugsweise für kleinkalibrige Hohlladungsgeschosse von etwa 27 mm Kaliber an verwendet. Er zeichnet sich u. a. dadurch aus, daß er gemäß den Forderungen der Spezifikation MIL-STD 1316 A

zwei voneinander unabhängige mechanische Sicherungselemente aufweist, die nur unter dem Einfluß der Beschußbedingungen den Rotor mit dem Detonator entriegeln.

Während des Rohrdurchlaufs des Geschosses entriegelt sich die sog. Rückschußbolzensicherung (s. Bild 1307), wodurch eine den Rotor sperrende Klinke freigegeben wird, die ihrerseits unter dem Einfluß der Zentrifugalkraft den Rotor entriegelt. Ebenfalls unter dem Einfluß der Zentrifugalkraft öffnet sich auch die die Vorrohrsicherheit steuernde Wickelbandsicherung (s. Bild 1306), so daß die Sperrkugeln den Kontaktstift freigeben und der Rotor nunmehr infolge seines Aufstellmomentes ohne Federkraft in die Zündstellung schwenken kann. Von diesem Zeitpunkt an ist der Zünder funktionsfähig, so daß bei Zielberührung die erforderliche Zündenergie durch den in der Spitze eingebauten piezoelektrischen Generator erzeugt werden kann.

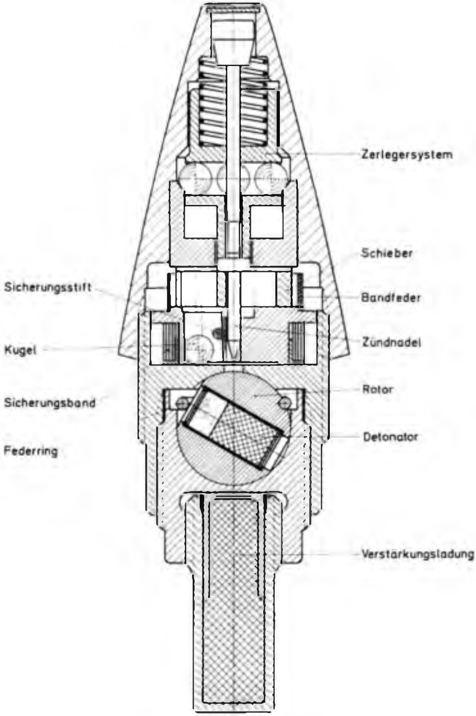


Bild 1322. *Aufschlagzerlegerzünder mit Detonatorsicherung.*

Als Beispiel für einen Kopfzünder ist in Bild 1322 ein drallabhängiger mechanischer Aufschlagzerlegerzünder mit Detonatorsicherung dargestellt.

In der Transportstellung ist die Zündnadel zunächst durch einen Schieber festgelegt, der durch eine Bandfeder gehalten wird. Weiter befindet sich der Detonator im Rotor in der „Sicherstellung"; der Rotor wird durch einen Federring festgehalten. Nach Beendigung der Beschleunigungsphase gibt der Federring den Rotor infolge der Zentrifugalkräfte frei, dieser schwenkt, wie beschrieben, in die Zündstellung.

Gleichzeitig beginnt die Abwicklung des Sicherungsbandes, wodurch nach einer bestimmten Zeit eine Kugel freigegeben wird, die nun unter Einwirkung der Zentrifugalkraft in einer zur Geschoßachse geneigten

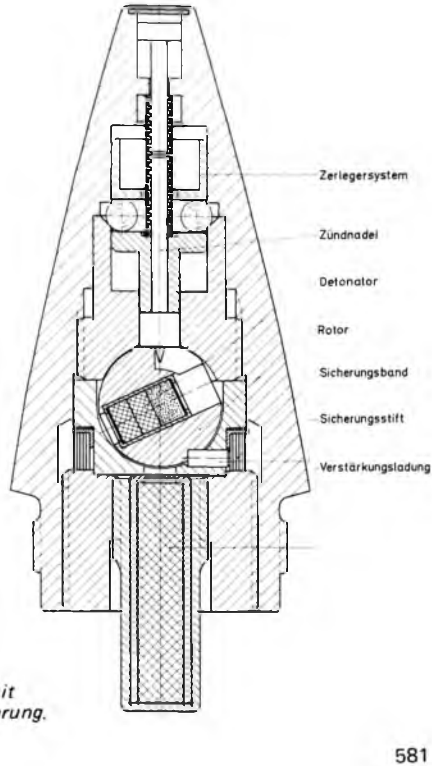


Bild 1323.
Aufschlagzerlegerzünder mit gesteuerter Detonatorsicherung.

Bohrung nach oben bis in den Schieber wandert; dieser inzwischen – ebenfalls durch die Fliehkraft – freigegebene Schieber erhält durch die in ihn eingedrungene Kugel eine ungleiche Massenverteilung, aufgrund deren er durch die Fliehkraft verschoben wird und die Zündnadel freigibt.

Ebenfalls nach Beendigung der Beschleunigungsphase wird das Zerlegersystem gespannt (vgl. Bild 1315); der Zünder ist somit entsichert und kann die Zündung der Sprengladung nun entweder durch Aufschlag bei Zielberührung oder durch Inkrafttreten des Zerlegersystems einleiten.

In Bild 1323 ist ebenfalls ein drallabhängiger mechanischer Aufschlagzerlegerzünder dargestellt, der aber im Gegensatz zum vorigen Beispiel eine gesteuerte Detonatorsicherung (s. Bild 1311) aufweist. Diese Ausführung hat hinsichtlich der Sicherheit den Vorteil, daß der Rotor mit dem Detonator erst nach Beendigung der Vorrohrsicherheit in die Zündstellung schwenken kann.

Entsicherung und Zündung erfolgen wie bereits im vorhergehenden Beispiel beschrieben.

Der in Bild 1324 in seinem prinzipiellen Aufbau gezeigte *Handgranatenzünder* arbeitet je nach Vorwahl mit oder ohne Verzögerung (m. V. oder o. V.).

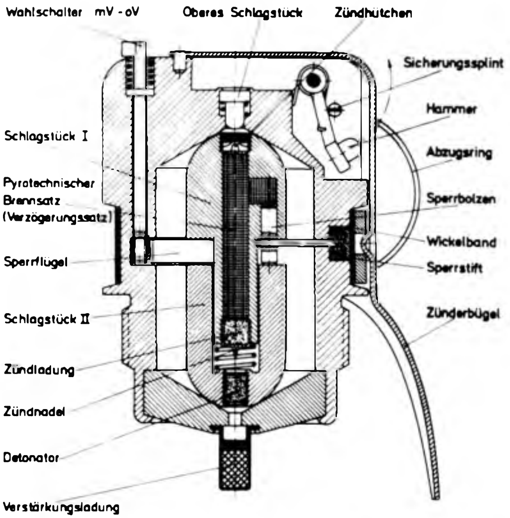


Bild 1324. *Doppelfunktionszünder für Handgranaten.*

Bei der *m. V.-Zündung* laufen Entsicherung und Funktion wie folgt ab: Der Wahlschalter steht in der Stellung m.V., so daß die beiden ineinandergreifenden Schlagstücke I und II durch den Sperrflügel in ihrer Lage innerhalb des Zünderraumes blockiert bleiben (sie treten bei der m.V.-Zündung nicht in Aktion). Nach dem Ziehen des Sicherungssplints mittels des Abzugsringes (bei festgehaltenem Zünderbügel) wird die Handgranate geworfen, wobei sich der Zünderbügel unter der Wirkung einer Feder abhebt und abfällt. Dadurch wird der unter Federspannung stehende Hammer freigegeben, der nun um seine Achse schwenkt und über ein oberes Schlagstück das Zündhütchen anschlägt. Damit wird der pyrotechnische Brennsatz (Verzögerungssatz) gezündet, der nach Ablauf einer gewissen Zeit die Zündladung initiiert, wodurch die Zündnadel vorgetrieben und der Detonator zur Zündung gebracht wird.

Bei der *o. V.-Zündung* müssen vor dem Wurf noch weitere Sicherungselemente in Aktion treten, um zu gewährleisten, daß – trotz Freigabe der Schlagstücke I und II mittels des am Wahlschalter festen Sperrflügels – eine Zündung nur erfolgen kann, wenn die Handgranate die Hand des Werfers verlassen hat.

Die Entsicherung läuft zunächst genauso ab wie bei der m.V.-Zündung; nur muß sich nach dem Abfallen des Zünderbügels beim Wurf erst ein Wickelband lösen, damit der unter Federspannung stehende Sperrstift den Sperrbolzen freigibt. Ist nun der pyrotechnische Brennsatz so weit, d.h. einschließlich seines seitlichen Ansatzes durchgebrannt, daß sich der Sperrbolzen ungehindert in axialer Richtung bewegen kann, sind auch die beiden Schlagstücke I und II frei gegeneinander verschieblich. Beim Abbremsen der Handgranate im Ziel verschieben sie sich infolge der freiwerdenden Trägheitskräfte ineinander, so daß die Zündnadel den Detonator ansticht.

Das System wirkt allseitig, da auch bei seitlichem Aufschlagen der Handgranate die Schlagstücke durch den kegelig ausgebildeten Zünderinnenraum zusammengeschoben werden. Versagt die Aufschlagzündung, so erfolgt zwangsläufig nach dem Abbrennen des pyrotechnischen Brennsatzes die m. V.-Zündung.

13.3. Treibladungsanzünder

Zum Anzünden der Treibladungen von Geschossen und Raketen reicht bei kleineren Kalibern in der Regel die Anzündenergie des Treibladungsanzünders oder sogar des Anzündhütchens allein aus, um die Treibladung anzuzünden, während bei größeren Kalibern häufig zur Verstärkung der Anzündenergie eine Beiladung (Booster, Verstärkerladung) zwischengeschaltet werden muß.

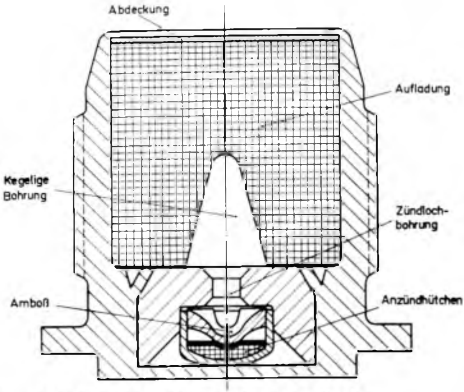


Bild 1325. *Mechanischer Treibladungsanzünder.*

Man unterscheidet je nach Art der Einleitung der Zündung zwischen mechanischen und elektrischen Treibladungsanzündern.

Mechanische Treibladungsanzünder (Bild 1325) sind mit einem Anzündhütchen ausgestattet, das durch Schlagenergie zur Zündung gebracht wird. Das Anzündhütchen besteht im wesentlichen aus einem mit einem schlagempfindlichen Zündsatz gefüllten Napf und einem Widerlager, dem Amboß. Bei Verformung des Anzündhütchenbodens durch den Schlagbolzen wird der Zündsatz gegen den Amboß gedrückt und dadurch entzündet. Der nach der Schlageinwirkung entstehende Zündstrahl trifft durch die Zündlochbohrung hindurch auf die Aufladung und brennt diese an. Um diesen Abbrand zu begünstigen, vergrößert man in der Regel die Anbrandoberfläche, z.B. durch eine kegelige Ausnehmung.

Nach dem Durchbrand der Aufladung platzt die Abdeckung durch den entstandenen inneren Druck auf, und der Zündstrahl tritt in Form eines Flammenkegels aus.

Während man früher im Hinblick auf einen möglichst gleichmäßigen und weichen Abbrand vornehmlich Schwarzpulver verwendete, geht man heute dazu über, das Schwarzpulver mit rauchlosen Nitrozellulosepulvern zu kombinieren, um die beim Schwarzpulverabbrand unerwünschten Nebenerscheinungen wie Verschmutzung der Waffe durch schwefelhaltige, schleimige Niederschläge zu reduzieren. Solche kombinierten Pulver werden entweder in gepreßter Form oder als lose Schüttung verwendet.

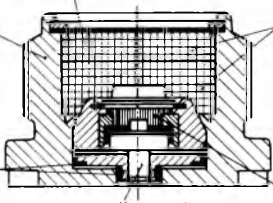


Bild 1326. *Elektrischer Treibladungsanzünder.*

Elektrische Treibladungsanzünder besitzen Anzündelemente, die durch einen Stromimpuls zur Zündung gebracht werden. Derartige elektrische Anzündelemente gibt es in verschiedenen Ausführungen; sie unterscheiden sich wie die bereits unter „Zünderbaugruppen" behandelten elektrischen Zündmittel durch die Art der Einleitung der Zündung. Diese erfolgt entweder durch Schmelzen eines Glühdrahtes, durch Verdampfen einer Metallschicht an einer Funkenstelle oder durch Stromdurchgang durch einen elektrisch leitfähigen Zündsatz.

Ebenso wie bei den mechanischen Treibladungsanzündern wird dabei mit dem Zündstrahl dieser elektrischen Elemente die Aufladung des Treibladungsanzünders angebrannt.

Bild 1326 zeigt einen elektrischen Treibladungsanzünder mit einem Zündelement, bei dem die Zündung durch Schmelzen eines Glühdrahtes eingeleitet wird.

Die Aufladung besteht aus zwei Preßlingen, von denen der unmittelbar über dem Zündelement liegende eine geringere Dichte hat als der vor der Abdeckung liegende. Dadurch wird ein guter, gleichmäßiger Abbrand erzielt.

14. Ballistische und waffentechnische Meßverfahren

Die Entwicklung und Fertigung von Waffen und Munition schließen laufende Kontrollen, Versuche und Erprobungen bis zur endgültigen Abnahme ein. Es ist dabei zu unterscheiden zwischen Untersuchungen (Werkstoffprüfungen) und Kontrollen, die der *Fertigung* vorangehen bzw. sie laufend begleiten, sowie der *Erprobung* der Waffen und der Munition, d.h. der Prüfung ihrer Funktion und Leistung, die in der Regel als „Anschießen" auf dem Schießplatz vor sich geht. Im folgenden sollen nur die der Erprobung dienenden Verfahren und dazugehörigen Einrichtungen behandelt werden; für die zur Fertigung zählenden Untersuchungen, sofern sie nicht an anderen Stellen dieses Buches erwähnt sind, wird auf die Fachliteratur verwiesen, u.a. [1], [2], [3].

Zum Erfassen und Messen der physikalischen Vorgänge und Zusammenhänge auf diesem Sondergebiet der Technik haben sich im Laufe der Zeit besondere Meßverfahren und -einrichtungen entwickelt, die in der jüngeren Zeit mit Hilfe der Kurzzeitphysik und der Elektronik noch wesentlich verfeinert und vervollkommnet wurden.

Die hauptsächlichen Meßverfahren betreffen: Auf dem Gebiet der Ballistik die Bestimmung des Höchstgasdruckes, des Gasdruckverlaufs und der Geschoßdurchlaufzeit, ferner die Ermittlung von Geschoßgeschwindigkeiten, der Flugbahn sowie abgangs- und endballistischer Werte wie Abgangsfehlerwinkel, Knalldruck, Treffbildvermessung, Durchschlagsleistung und Splitterwirkung; auf dem Gebiet der Explosivstoffe die Bestimmung von Geschwindigkeiten, Drücken und Zeiten; auf waffentechnischem Gebiet schließlich die Erfassung von Bewegungsvorgängen, Rückstoßkräften, Materialbeanspruchungen und Temperaturen.

14.1. Zeitmessung, Registrierung und Auswertung

Die Waffenmeßtechnik benutzt wegen der meist in wenigen tausendstel bis millionstel Sekunden ablaufenden Vorgänge die *anzeigemäßige Ermittlung* der Zeitdauer, die *kontinuierliche grafische Aufzeichnung* der Verläufe in Kurvenform (Oszillogramme) oder die *unmittelbare bildmäßige Darstellung* (Kurzzeitfotografie). Zum eigentlichen Erfassen der zu untersuchenden Vorgänge dienen Meßwertaufnehmer und Meßwertwandler, die z.B. Druck, Bewegung, Temperatur, Lichteffekte usw. in vorwiegend elektrische, für das Aufzeichnen geeignete Signale umsetzen. Da viele Meßgeräte in verschiedenartigen Zusammenstellungen und Abwandlungen bei den einzelnen Meßaufgaben häufig anzutreffende Hilfsmittel darstellen, werden sie vorweg kurz beschrieben. Die darüber hinaus entwickelten speziellen Einrichtungen sind in den entsprechenden Abschnitten gesondert erläutert.

Erklärlicherweise können im Rahmen dieses Buches nicht sämtliche Meßverfahren und -einrichtungen behandelt werden; gegebenenfalls sei auf die Fachliteratur verwiesen, z.B. [4].

14.1.1. Zeitmeßgeräte

Für das unmittelbare Messen kurzer Zeiten dienen als direktanzeigende Geräte elektronische Kurzzeitmesser, sogenannte Counter (Bild 1401). Das sind elektronische Stoppuhren, deren kleinstes Intervall allgemein eine Mikrosekunde beträgt. Die Anzeige ist dekadisch unterteilt und wird sowohl mit Zeigern als auch vorwiegend mit Ziffern (Zählröhren, Ziffernröhren) sichtbar gemacht (Digitalmessung). Ein Zeitnormal bestimmt das kürzeste meßbare Zeitintervall.



Bild 1401. *Elektronischer Kurzzeitmesser (Counter).*

Ferner dienen der Zeitmessung auch quarzgesteuerte, dekadisch gestufte Zeitmarkengeber (Impulsgeber) oder sehr genau arbeitende Stimmgabelzeitnormale mit einer Genauigkeit von etwa 0,1 %, die in Verbindung mit den nachstehend genannten, zur grafischen Aufzeichnung dienenden Registriergeräten, den Oszillographen, benutzt werden.

14.1.2. Registriergeräte

Zum kontinuierlichen Aufzeichnen der Vorgänge in Kurvenform werden mechanisch, optisch-mechanisch oder elektrisch-optisch arbeitende Registriereinrichtungen verwendet. Die letztgenannten werden anschließend beschrieben, die Beschreibung der mechanischen und optisch-mechanischen Registriereinrichtungen erfolgt im Verlaufe der weiteren Ausführungen bei der jeweiligen Erwähnung ihrer Anwendung.

Lichtstrahloszillographen verwenden zur optisch-fotografischen Aufzeichnung Galvanometer, die anstelle von Zeigern mit kleinen Spiegeln versehen sind. Die den Galvanometern von den Meßwertaufnehmern oder Meßwertwandlern zugeführten elektrischen Ströme bewirken eine Drehung dieser Galvanometerspiegel; die dadurch hervorgerufene Ablenkung der auf die Spiegel geworfenen Lichtstrahlen dient zur fotografischen Aufzeichnung der zu untersuchenden Vorgänge auf einem ablaufenden Registrierfilm. Als Lichtquellen dienen heute vorwiegend Quecksilberdampf-Hochdrucklampen (Ultraviolettlicht), die bei Benutzung von Spezialfilm eine fotografische Registrierung ohne Entwicklung gestatten (Direktschreiber). Die Filmablaufgeschwindigkeit und die Grenzfrequenzen der Galvanometer bestimmen die Einsatzmöglichkeit der Geräte.



Bild 1402. *Lichtstrahloszillograph (Fabrikat Siemens).*

Für Vorgänge im Nanosekundenbereich werden Kathodenstrahloszillographen verwendet. Die Kathodenstrahlröhre (Braunsche Röhre) besitzt ein elektronisches Ablenksystem, das den Elektronenstrahl in Verbindung mit den Meßwertwandlern ablenkt und auf einem Bildschirm sichtbar macht. Die Zeitauflösung erfolgt über ein zweites Ablenksystem senkrecht zur Meßwertablenkung.

Die Aufzeichnung erfolgt über vorgesetzte Fotokameras, vorzugsweise Polaroidkameras, die in wenigen Sekunden ein fertiges Oszillogramm liefern. Zur Registrierung über längere Zeiten dienen Filmablaufkameras.

Die Meßwerte können auch durch *Meßwertdrucker* festgehalten werden. Diese gestatten das zahlenmäßige (digitale) Erfassen der Meßwerte. Das kleinste Intervall wird durch die Arbeitsgeschwindigkeit des Druckwerkes bestimmt. Diese Geräte können demnach nur zum Anzeigen verhältnismäßig langsam verlaufender Änderungen oder einzelner, mit Zeitabstand aufeinanderfolgender Meßwerte verwendet werden.

In der modernen Versuchstechnik fällt meist eine Fülle von Meßwerten an, die mit konventionellen Mitteln weder in der zur Verfügung stehenden Zeit noch mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand weiter zu verarbeiten sind. Deshalb erfolgt heute die Meßwerterfassung und die Auswertung der Daten meist mit Hilfe von Datenverarbeitungsanlagen.

Man kann dabei grundsätzlich zwei verschiedene Methoden anwenden: Die erste verwendet eine Anlage ohne Rechner; der anfallende Datenfluß wird gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt einer Rechenanlage zur Weiterverarbeitung zugeführt. Die Speicherung erfolgt meist schon in einer dem Rechner kompatiblen Form, d.h. auf Lochkarten, Lochstreifen oder Magnetbändern.

Diese Methode empfiehlt sich dann, wenn entweder die zeitliche Dichte der Daten gering ist und die Auswertung durch den Rechner dagegen nur kurze Zeit beansprucht — man spricht dann von einer Datenkompression — oder wenn umgekehrt die zeitliche Dichte der Daten groß ist, aber die eigentliche Verarbeitung im Rechner eine zeitliche Dehnung der Daten erfordert.

Ist die anfallende Datenmenge sehr groß, wird diese Art der Meßwerterfassung unter Umständen sehr aufwendig. Man wendet dann die zweite Methode an, bei der Meßwerterfassungsanlage und Rechner eine Einheit bilden. Die Meßwerte werden direkt im Kernspeicher des Rechners gespeichert, durch ein Programm abgerufen und weiterverarbeitet. Die Speicherplätze sind innerhalb kurzer Zeit für die Aufnahme neuer Meßwerte frei.

Es ist nicht notwendig, für jede Aufgabe eine besondere Rechenanlage einzusetzen. In den meisten Fällen wird die Kapazität eines vorhandenen Rechners nicht ausgenutzt; dieser kann dann im sog. „Time sharing"-Betrieb gleichzeitig mehrere der oben umrissenen Aufgaben übernehmen.

Die Organisation derartiger Anlagen ist Aufgabe der Systemanalyse und des Systemmanagements. Zur genaueren Orientierung sei auf die angegebene Literatur [5] und [6] verwiesen.

14.1.3. Abbildende Geräte für Kurzzeitvorgänge

Die unmittelbare, bildmäßige Erfassung von Vorgängen, die zusätzlich zu den Messungen oft eine Fülle von Informationen liefert, erfolgt mit Hilfe von Hochfrequenz-Filmkameras sowie mit besonderen Einrichtungen der Funken-, Röntgen- und Laserblitzfotografie. Die Geräte und Einrichtungen sind im Abschnitt 14.7, Kurzzeitfotografie, gesondert beschrieben.

14.2. Messungen zur inneren Ballistik

Für die Bestimmung von Ladung und Beanspruchungen an der Waffe und der Munition ist die Kenntnis des Höchstgasdruckes erforderlich. Zum Studium der innenballistischen Vorgänge dient sodann das Messen und Aufzeichnen des gesamten Gasdruckverlaufs, aus dem unter anderem die Zündverzögerung, der zeitliche Druckanstieg, das Druckmaximum, der Abklingvorgang, der Restgasdruck beim Durchgang des Geschosses durch die Mündung und die Geschoßdurchlaufzeit zu entnehmen sind (vgl. 2, Innere Ballistik).

14.2.1. Messen des Höchstgasdruckes

Die klassische Methode, die auch heute noch zur Höchstgasdruckbestimmung angewendet wird, beruht auf der Stauchung von Kupferzylindern durch den Gasdruck. Aus dem Maß der Stauchung wird die Größe des Gasdruckes über Stauchtabellen ermittelt. Diese Tabellen werden mit Hilfe statischer Eichung der Kupferkörper aufgestellt. Wegen unterschiedlicher, nicht vermeidbarer Werkstoffeigenschaften der einzelnen Kupferchargen, aus denen jeweils größere Mengen von Stauchkörpern gefertigt werden, gilt für jede Charge eine besondere Stauchtabelle.

Die Messungen werden je nach Kaliber mit Meßeiern oder mit Gasdruckmeßgeräten durchgeführt.

Das *Meßei* oder *Stauchzeug* (Bild 1403) besteht aus einem zweiteiligen Stahlgehäuse zur Aufnahme des kupfernen Stauchkörpers. Der Stauchkörper ist zwischen dem Stempel und der Gehäusefläche spielfrei ein-

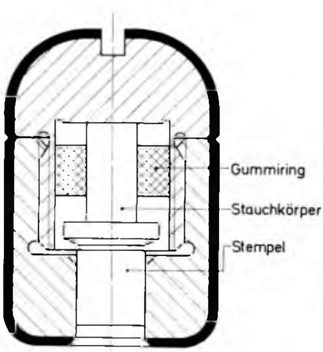


Bild 1403. *Meßei.*

gesetzt und durch den Gummiring zentrisch gehalten. Das Meßei wird der Treibladung beigepackt, beim Schuß drücken die Pulvergase auf den Stempel. Das Stahlgehäuse ist außen mit einer starken Kupferschicht überzogen, damit beim Schuß die Rohrwand nicht beschädigt wird. Soweit es der Ladungsraum erlaubt, werden zwei Meßeier zur Mittelwertbildung eingelegt.

Für Gasdruckmessungen bei extremen Pulvertemperaturen (etwa + 60 °C und — 60 °C) wird mit der Munition auch das Meßei temperiert. Bei der Auswertung der Stauchung sind dann Korrekturen nötig.

Der gemessene Höchstgasdruck entspricht nicht immer dem wahren Gasdruck. Ursachen der Abweichungen können sein:

Abhängigkeit des Verformungswiderstandes des Stauchkörpers von der Stauchgeschwindigkeit,

Verfälschung durch die Stempelmasse,

Einfluß der Stempelreibung (Fettung) und

Einfluß der Temperatur.

Obwohl die Messungen mit Stauchzylindern keine Absolutwerte erwarten lassen, wird die Methode wegen ihrer Einfachheit immer noch benutzt. Als Vergleichsmessung ist sie unentbehrlich.

Für Abnahme- und Vergleichsbeschüsse wird die Größe der zu verwendenden Meßeier vereinbart.



Bild 1404. *Gasdruckmeßgerät.*

Das *Gasdruckmeßgerät* (Bild 1404) besteht aus einem Waffenrohr (dem Gasdruckmeßlauf) mit Verschlußblock und dem eingesetzten Druckmeßelement. Zur Doppelmessung oder zum Vergleich mit anderen Meßverfahren, z.B. der Kalotten-, der Kegel- und der Piezomethode, besitzt das Gasdruckmeßgerät meist zwei in derselben Ebene liegende Meßstellen. Gasdruckmeßgeräte werden vorwiegend bei Kalibern unter 40 mm eingesetzt.

Das Druckmeßelement (Bild 1405) gleicht im Aufbau und in der Arbeitsweise dem Meßei. Neben den beim Meßei genannten Ursachen der Meßbeeinflussung ist hier noch die Länge des Gaskanals zu berücksichtigen.

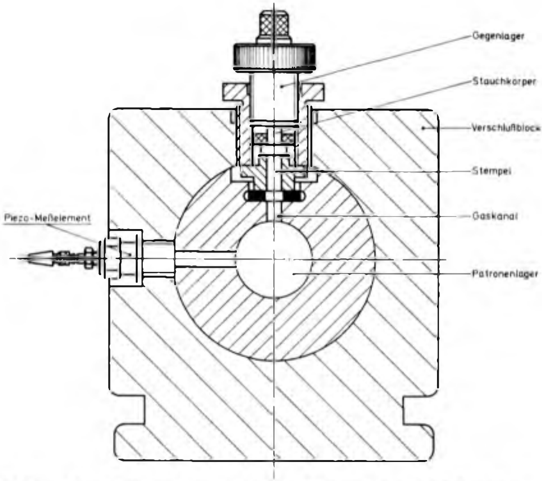


Bild 1405. *Gasdruckmeßgerät (Schnitt) mit zwei Meßstellen.*

Normalerweise wird die Messung im Bereich des Patronenlagers durchgeführt und dazu die Patronenhülse angebohrt. Der Gaskanal wird mit Fett ausgefüllt.

14.2.2. Messen des Gasdruckverlaufs

Für das Messen des Gasdruckverlaufs dienen Meßwertaufnehmer (Wandler), die den Gasdruck in elektrische Werte umformen und somit sichtbar und/oder registrierbar machen. Für die Registrierung finden je nach Meßaufgabe die unter 14.1.2 genannten Geräte Verwendung.

Als Meßwertaufnehmer dienen vorwiegend Piezogeber (Bild 1406).

Der piezoelektrische Effekt ist die Eigenschaft bestimmter Kristalle, z.B. Quarz, Turmalin und Seignettesalz, sich elektrisch aufzuladen, sobald sie elastisch deformiert werden. Die Form der Kristalle wird so gewählt, daß bei Druckbelastung in Richtung ihrer elektrischen Achse auf

den zu dieser Achse senkrechten Flächen elektrische Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens entstehen. Werden diese Flächen durch Versilbern leitend gemacht, so entsteht ein Kondensator, und man kann zwischen den so entstandenen Elektroden eine elektrische Spannung messen, die dem Druck direkt proportional ist.

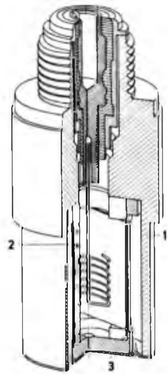


Bild 1406. *Piezogeber (Werkfoto Kistler GmbH);*
1 Gehäuse, 2 Quarzpakete, 3 Membrane mit Temperaturkompensation.

Da die Eigenfrequenz der Meßkristalle sehr hoch liegt (bei Quarz bis zu 200 kHz) und nur eine Wegänderung in der Größenordnung der elastischen Verschiebung auftritt, sind die Piezogeber besonders gut für das Messen sehr schneller Druckänderungen geeignet.

Das Messen und Verstärken der auftretenden Spannungsänderungen geschieht mit Hilfe von Elektrometern kleiner Kapazität und empfindlichen Gleichspannungsverstärkern.

Die Piezogeber werden ähnlich den Stauchapparaten in Gasdruckmeßgeräten oder, den besonderen Anforderungen entsprechend, in Waffenrohren oder auch Kartuschen eingesetzt.

Bild 1407 zeigt ein mit einem Piezogeber aufgenommenes und mit dem Kathodenstrahloszillographen aufgezeichnetes Gasdruckdiagramm. Über die Aus- und Bewertung von Gasdruckdiagrammen siehe 2, Innere Ballistik.

Die Genauigkeit dieser Meßmethode ist im wesentlichen abhängig von der Eigenfrequenz der gesamten Meßmittel (Meßwertaufnehmer, Übertragungskabel, Verstärker und Registriergeräte).

Zur Registrierung von Gasdruckverläufen können auch andere physikalische Effekte ausgenutzt werden, z.B. Dehnungsmeßstreifen (s. 14.6.4).

14.3. Messungen zur äußeren Ballistik

Die wichtigste außenballistische Messung ist das Bestimmen der Geschoßgeschwindigkeit an der Rohrmündung v_0. Weitere Messungen erstrecken sich auf das Bestimmen der Geschoßgeschwindigkeit am Ziel, der Flugzeit des Geschosses von der Mündung bis zum Ziel, das Vermessen der Geschoßflugbahn, des Geschwindigkeitsverlaufs und des Treffbildes.

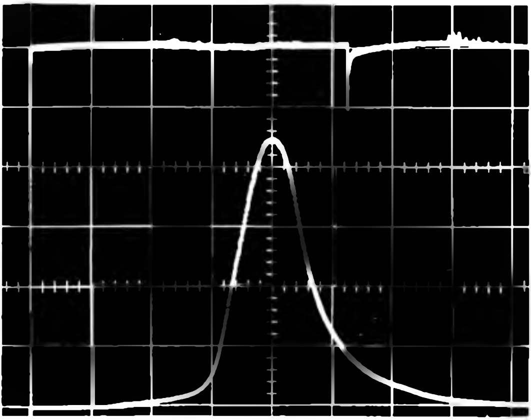


Bild 1407. *Gasdruckdiagramm einer 20-mm-Patrone (vgl. Bild 203).*

14.3.1. Messen der Geschoßgeschwindigkeit

Man mißt die Zeit t, in der das frei fliegende Geschoß einen bestimmten Weg s außerhalb des Rohres zurücklegt. Dazu wird vor der Mündung eine Meßstrecke aufgebaut; die Durchlaufzeit des Geschosses durch die Meßstrecke ergibt nach der Beziehung $v = \Delta s / \Delta t$ die Geschwindigkeit. Aus v wird durch außenballistische Extrapolation die Mündungsgeschwindigkeit v_0 gebildet (s. 3, Äußere Ballistik).

Zur Signalgebung an den Meßpunkten dienen Prellkontakte, Drahtgitter, Kontaktfolien, Spulen, Lichtschranken, Kontaktmikrophone oder ähnliches. Beim Durchschießen werden vorwiegend elektrische Impulse erzeugt, die die Zeitmeßgeräte auslösen und stoppen.

Das klassische, über viele Jahrzehnte gebrauchte Zeitmeßgerät war der *Boulengé-Apparat.* Bei diesem Gerät wird beim Durchschuß des ersten Meßpunktes, z.B. eines Gitters, ein Fallstab freigegeben, in den beim

Durchschuß des zweiten Gitters während des freien Falls eine Meßmarke eingeschlagen wird, aus deren Abstand von einer Bezugsmarke die gesuchte Zeit t ermittelt werden kann.

Das Boulengé-Gerät wird heute kaum mehr verwandt. Ein wesentlicher Nachteil ist die erforderliche große Meßstrecke (Rahmenabstand etwa 50 bis 100 m). An die Stelle des Boulengé sind allgemein elektronische Zeitmeßgeräte mit dekadischem Zeitmaßstab im Mikrosekundenbereich getreten. Mit diesen Geräten ist es möglich, die Meßbasis auf wenige Meter, meist 10 m, in Sonderfällen auf 1 bis 2 m zu verkürzen.

Allgemein wird heute eine berührungslose Auslösung bevorzugt. Sie ist besonders dann angebracht, wenn es sich um scharfe Geschosse mit empfindlichen Zündern handelt. Eine solche berührungslose Auslösung kann z.B. mit Hilfe von Spulen (z.T. mit nur einer Windung) erfolgen, durch die das vor dem Schuß magnetisierte Geschoß geschossen wird. In diesen Spulen werden beim Durchschuß elektrische Impulse induziert, die als Meßsignale dienen (Bilder 1408 und 1409).

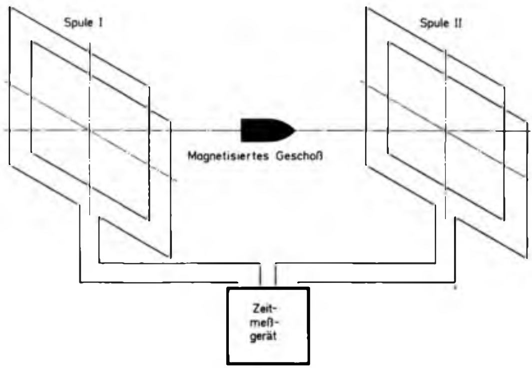


Bild 1408. *Spulenmeßstrecke.*

Die Spulenanordnung kann dort, wo keine oder nur eine schlechte Möglichkeit zum Aufbau einer ortsfesten Spulenmeßstrecke besteht, z.B. bei feldmäßiger v_0-Messung oder auf Schiffen, auch unmittelbar an der Mündung des Geschützrohres erfolgen (Bild 1410). Die Meßstrecke beträgt bei einer derartigen Anordnung weniger als 1 m. Die beiden Mündungsspulen sind als elektrischer Schwingkreis geschaltet und in Resonanz. Durch den Durchschuß des Geschosses wird diese Resonanzbedingung gestört, und die auftretenden Störimpulse dienen der Messung. Dabei braucht das Geschoß nicht magnetisiert zu werden.

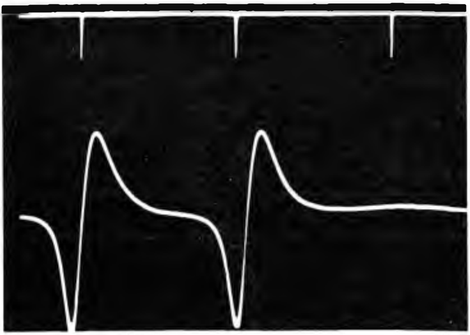


Bild 1409. *Diagramm eines Spulendurchschusses.*



Bild 1410. *Spulenmeßstrecke an der Rohrmündung (Werkfoto Ebauches).*

Eine andere Art der berührungslosen Auslösung ist die mittels Lichtschranken. Bei diesen wird das vorbeifliegende Geschoß über Optiken auf Fotozellen abgebildet oder es wird in die Fotozellen einfallendes Licht durch das Geschoß ausgeblendet; dadurch werden elektrische Impulse zum Steuern der Registriergeräte erzeugt. Die Lichtschranken sind oft zu einem „Meßbalken" vereinigt, auf dem sie so justiert sind, daß auch in größerem Abstand zur Flugbahn eine genau definierte Meßbasis gewährleistet ist (Bild 1411).



Bild 1411. *Meßbalken auf Stativ (Fabrikat Drello).*

Der Meßbalken wird seitlich oder unterhalb der Geschoßflugbahn aufgestellt. Bei waagerechter Lage des Meßbalkens und Schießen mit Erhöhung ist die auf die Flugbahn projizierte Meßbasis unter Berücksichtigung des Erhöhungswinkels einzusetzen.

Zur Ermittlung der Geschoßendgeschwindigkeit v_z wird die Meßstrecke ins Ziel verlegt. Zusammen mit einer Auslöseeinrichtung in der Nähe der Mündung kann damit auch die Gesamtflugzeit des Geschosses bestimmt werden.

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Geschoßgeschwindigkeit ist das im nächsten Abschnitt behandelte Radarverfahren.

Bei Raketen tritt an die Stelle der v_0 die Brennschlußgeschwindigkeit v_{Bs}, d.h. die Geschwindigkeit, welche die Rakete im Zeitpunkt des Verlöschens der Treibladung erreicht hat. Da der Flugkörper zu diesem Zeitpunkt meist sehr weit vom Abschußpunkt entfernt und entsprechend hoch liegt, ist die Brennschlußgeschwindigkeit nur mit optischen Meßmethoden oder mittels Radar zu erfassen.

14.3.2. **Vermessen der Flugbahn**

Zum Erfassen der Flugbahn sind die Bahnwinkel zur Horizontalen, die Flughöhen und die Reichweite zu bestimmen. Für Geschosse läßt sich der Bahnverlauf aus der v_0, der v_z, der Flugzeit und dem Abschußwinkel berechnen.

Bei ballistischen Raketen setzt sich die Flugbahn aus der Beschleunigungsphase (bis Brennschluß) und der anschließenden ballistischen Bahn zusammen. Beide Bahnteile sind meßtechnisch zu erfassen.

Die Flugbahnregistrierung und -vermessung kann optisch entweder mittels zweier *Fototheodolite* von verschiedenen Standpunkten aus erfolgen (Stereofotografie) oder mittels einer Kamera seitlich senkrecht zur Flugbahnebene. Man bezeichnet diese Methoden als fotogrammetrische Meßverfahren.

Bei dem ersten Verfahren bildet die Verbindungslinie zwischen den Kamerastellungen die Meßbasis. Im Normalfall stehen die beiden Kameras zu beiden Seiten hinter dem Abschußpunkt und sind mit den optischen Achsen parallel zur Flugbahnebene gerichtet (Bild 1412).

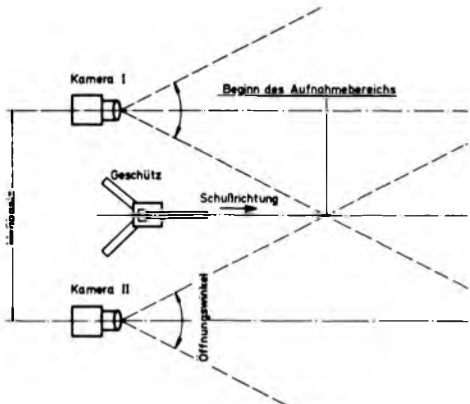


Bild 1412. *Normalstereogramm.*

Die Auswertung erfolgt unter Zugrundelegung der vermessenen Standpunkte (Meßbasis) und unter Berücksichtigung des fotografischen Abbildungsmaßstabes mit dem Stereokomparator. Er gestattet eine sehr genaue Auswertung und liefert eine räumliche Darstellung des Flugbahnverlaufs.

Die zweite Methode mittels nur einer seitlich und senkrecht zur Flugbahnebene aufgestellten Kamera ist in Bild 1413 dargestellt.

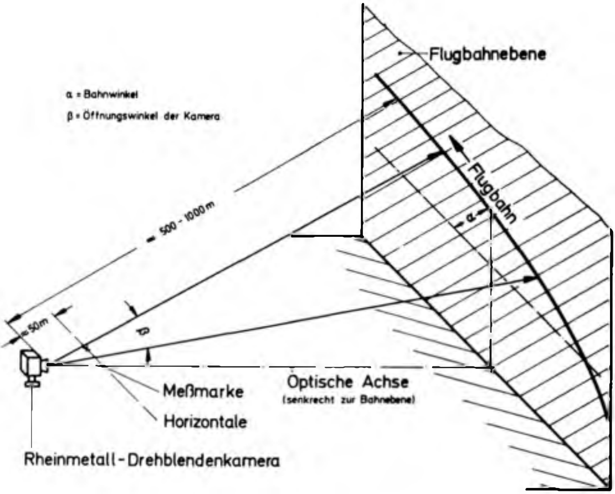


Bild 1413. *Aufstellung der Drehblendenkamera (Prinzip).*

Die für beide Aufnahmemethoden benutzten Fototheodolite bestehen im Prinzip aus Fotoapparaten, deren Verschlüsse in einem bestimmten Zeitrhythmus betätigt werden und damit die Abbildung der Bahn als gestrichelte Linie wiedergeben. Der Strichabstand entspricht den Zeiteinheiten für die erfaßte Bahnstrecke. Die intermittierende Belichtungssteuerung erfolgt vorzugsweise mit rotierenden Schlitzscheiben hinter oder innerhalb der Optik (Drehblendenkamera, Bild 1414 und 1415).

Bei der Anwendung von zwei Kameras nach dem stereometrischen Verfahren müssen die Drehblenden exakt mit gleicher Drehzahl und gleicher Phasenlage laufen, um die Meßpunkte einander zuordnen zu können. Die Steuerung erfolgt elektronisch.

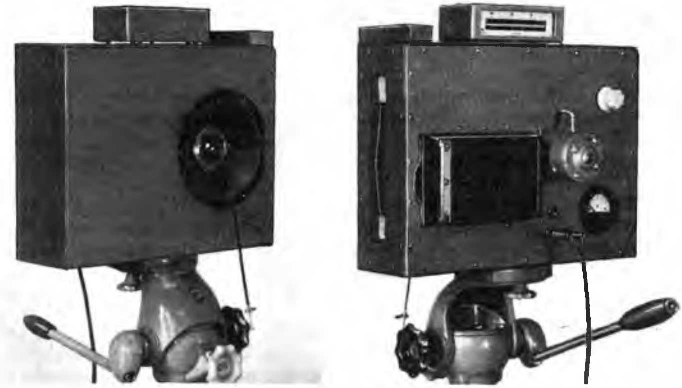


Bild 1414. *Drehblendenkamera, Konstruktion Rheinmetall.*

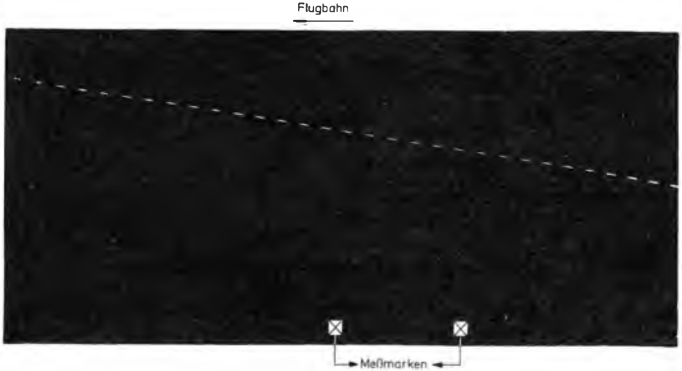


Bild 1415. *Mit der Rheinmetall-Drehblendenkamera aufgenommener Flugbahnabschnitt.*

Ferner können zusätzlich, ebenfalls in seitlicher senkrechter Aufstellung zur Flugbahnebene, mit einer Filmablaufkamera (Streak-Kamera) die Abgangsvorgänge bei Raketen erfaßt werden. Der ablaufende Film bewegt sich kontinuierlich senkrecht zur Flugrichtung und liefert eine

Zeit-Weg-Kurve, aus welcher der Abgangsverlauf, d.h. Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung, entnommen werden kann. Das Diagramm erlaubt außerdem eine Beurteilung der Raketenflamme und damit des Treibstoffabbrandes (Bild 1416).

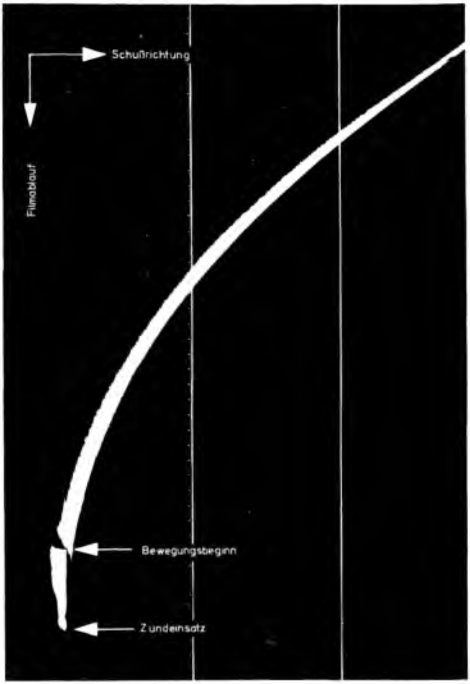


Bild 1416. *Zeit-Weg-Registrierung mit der Filmablaufkamera.*

Wegen ihres starren und begrenzten Aufnahmewinkels reichen *Fototheodolite* nicht aus, um Flugobjekte über weite Strecken (z.B. mehrere km) zu vermessen. Für diesen Zweck benutzt man *Kinotheodolite.* Sie arbeiten im Prinzip wie normale Filmkameras. Auf ihrem Film werden sowohl das Flugobjekt als auch gleichzeitig der Höhen- und Seitenwinkel aufgenommen. Mindestens zwei solcher Foto- bzw. Kinotheodolite verfolgen von einer genau vermessenen Basis das Flugobjekt. Die Steuerung für den Weitertransport und die Belichtung sowie die Kennzeichnung der Einzelbilder des Films erfolgen gleichzeitig und gemein-

sam von einem Steuergerät aus. Aus den jeweils zusammengehörigen Filmbildern wird dann die Lage des Flugobjektes mit Hilfe eines Stereokomparators ausgemessen. Diese Methode wird vorwiegend bei größeren Flugobjekten angewandt, jedoch z.T. durch ähnlich eingesetzte Radargeräte ersetzt.

Erwähnt sei ferner eine weitere Methode zur Geschwindigkeits- und Flugbahnvermessung, die bei kleinen Kalibern mit rasanter (flacher) Flugbahn über eine Bahnweite von etwa 1 km zur Anwendung kommen kann (Bild 1417). Sie beruht auf der Aufnahme der vom Geschoß G ausgehenden Kopfwelle K beim Überfliegen einer Reihe längs der Schußrichtung ausgelegter Mikrofone M1, M2, M3. Diese werden in Abständen von z.B. 100 m angeordnet und müssen sowohl nach der Entfernung als auch ihrem senkrechten Abstand von der Mündungswaagerechtengenau vermessen sein. Die Geschoßkopfwelle erzeugt in den Mikrofonen elektrische Impulse, deren zeitlicher Abstand mit Oszillographen oder Countern gemessen wird. Je nach der Flughöhe H über den Mikrofonen und der Geschwindigkeit des Geschosses (mit welcher sich der Winkel der Kopfwelle ändert) werden die Mikrofone von der Kopfwelle erst angeschlagen, wenn das Geschoß bereits ein beträchtliches Stück Δs an diesen vorbei ist. Mehrere Papierscheiben werden in der Flugbahn aufgestellt, um die in der Auswertung zu berücksichtigende Flughöhe zu ermitteln. Da die Auswertung bei dieser Methode umständlich ist, wird sie kaum angewandt.

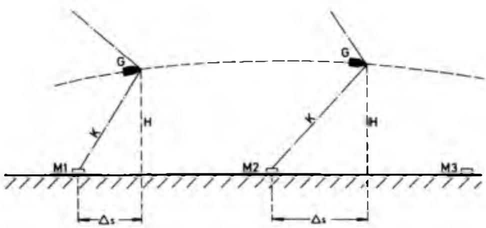


Bild 1417. *Prinzip der Mikrofonmethode; Bezeichnungen im zugehörigen Text.*

Die optischen Verfahren werden entweder bei Nacht oder unter Verwendung geeigneter Zusatzeinrichtungen bei Tage (auch z.B. mit Infrarotfotografie) benutzt.

Zur Messung der Geschoßgeschwindigkeit durch *Radar* [7] lassen sich grundsätzlich zwei Verfahren anwenden: Das Radar-Echoverfahren und die Ausnutzung des Dopplereffektes der Radarwellen.

Im ersten Fall wird von einem Radarsender ein kurzer elektromagnetischer Schwingungsimpuls ausgesandt und die Zeit bis zum Eintreffen

des vom Geschoß reflektierten Impulses im Empfänger, der mit dem Sender identisch ist, gemessen. Wird dieser Vorgang mehrmals wiederholt, d.h., wird eine schnelle Impulsfolge ausgestrahlt, so läßt sich aus den gemessenen Zeitdifferenzen die Geschwindigkeit des Geschosses berechnen (Bild 1418).

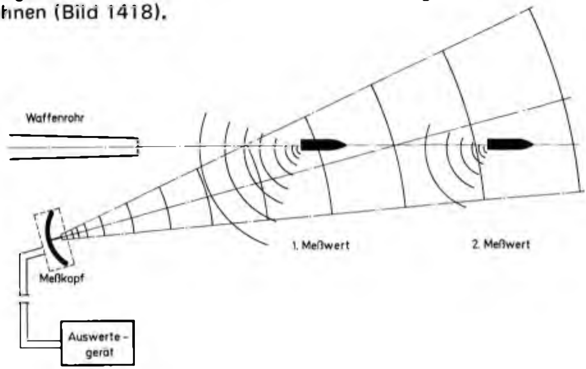


Bild 1418. *Prinzip des v_0-Radars.*

Diese Methode hat den Nachteil, daß bei kurzen Entfernungen die zu messenden Zeitdifferenzen sehr klein sind und dann der apparative Aufwand entsprechend hoch wird.

Die Messung der Geschoßgeschwindigkeit durch Ausnutzung des Dopplereffektes bei elektromagnetischen Wellen im Dezimeter- oder Zentimeterwellenbereich ist erst in den letzten Jahren entwickelt worden [8], [9], [10]. Eine von einem Sender ausgestrahlte Welle wird vom Geschoß reflektiert. Da sich das Geschoß bewegt, verändert sich die Phase der reflektierten Welle gegenüber der der eingestrahlten (Dopplereffekt). Aus der Phasendifferenz ergibt sich eine Frequenzdifferenz, die der Geschwindigkeit des Geschosses direkt proportional ist (Bild 1419).

Für die Änderung der Phase im Bogenmaß gilt:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda}\,\frac{dr}{dt} = 2\pi f_D, \qquad (1)$$

wobei

λ die Wellenlänge der ausgestrahlten Welle und
f_D die Frequenzdifferenz (=Dopplerfrequenz)

ist.

Daraus ergibt sich die Bahngeschwindigkeit des Geschosses zu

$$v_B = \frac{1}{\cos\vartheta}\,\frac{dr}{dt} = \frac{\lambda}{2\cos\vartheta}\,f_D. \qquad (2)$$

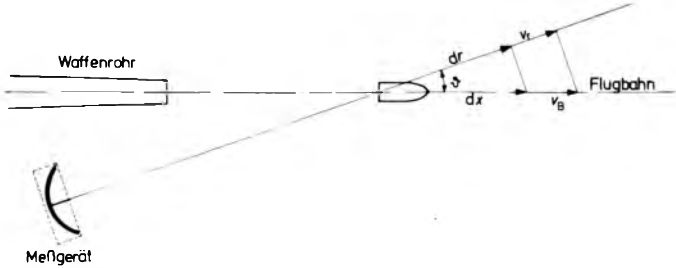


Bild 1419. *Messen der Geschoßgeschwindigkeit mit Hilfe der Doppler-Radar-Methode; Prinzip.*

Man braucht also nur in einem mit dem Sender gekoppelten Empfänger die Dopplerfrequenz zu messen und kann sofort die Geschwindigkeit des Geschosses berechnen.

Diese Methode hat wesentliche Vorteile:

Sie gelingt auch auf kurzen Entfernungen (v_0-Messungen);

die Geschoßgeschwindigkeit kann über längere Bahnstrecken hinweg gemessen werden, praktisch solange das Geschoß sich innerhalb der Reichweite des Radargerätes befindet;

auch die Geschwindigkeitsänderung des Geschosses kann gemessen werden.

Es sei noch erwähnt, daß sich diese Doppler-Radar-Methode prinzipiell auch zum Messen der Geschoßgeschwindigkeit im Rohr verwenden läßt [11].

14.4. Messungen zur Abgangsballistik

Die Messungen zur Abgangsballistik erstrecken sich auf die Erfassung der Rohrbiegeschwingungen beim Abschußvorgang, auf die exakte Bestimmung des Mündungsdurchganges des Geschosses sowie die fotografische und meßtechnische Aufzeichnung der Gasströmung an der Mündung und ihre Auswirkungen (Knalldruck).

14.4.1. Messen der Rohrbiegeschwingungen und der Rohrablage

Bei der Untersuchung der Rohrbiegeschwingungen und der Rohrablage (Parallelverschiebung der Mündung), die u.a. den Abgangsfehler verursachen (vgl. 4, Abgangsballistik), wird einmal der Rohrmündungs-

winkel als Tangente an der Rohrseele im Bereich der Rohrmündung und seine zeitliche Änderung, also die Winkelgeschwindigkeit, zum anderen die Rohrablage und die dabei auftretende Rohrquergeschwindigkeit während des Abschußvorgangs gleichzeitig festgestellt und registriert.

Die Aufzeichnung der *Winkel-Zeit-Kurve* (Bild 1421) erfolgt durch die optische Registrierung eines von der Lichtquelle 2a ausgesandten Lichtstrahls (Bild 1420), der zur Mündung umgelenkt, von einem dort angebrachten Spiegel 3 entsprechend der beim Schuß auftretenden Rohrschwingungen reflektiert und über einen Teilerwürfel in die Aufnahmekamera 5a gelenkt wird.

Der Spiegel an der Rohrmündung ist so befestigt, daß sämtliche auftretenden Schwingungen, auch die höherer Ordnung, übertragen werden, da die Eigenfrequenzen des Befestigungssystems die Meßfrequenzen um ein Vielfaches übersteigen.

Es ist ebenfalls möglich, die Auslenkung des Lichtstrahls in elektrische Signale umzusetzen, wozu eins der unter 14.1 beschriebenen Geräte zur Registrierung benutzt werden kann.

Für das Messen der *Rohrablage* und der *Rohrquergeschwindigkeit* wird ein optisch-elektrisches Meßverfahren angewandt (Bild 1420). Dabei wird ein Laserstrahl 2b, der zur Mündung umgelenkt wird, von einem dort angebrachten Tripelspiegel 4 reflektiert und über einen Teilerwürfel auf eine Aufnahmekamera 5b mit einer positionsempfindlichen Fotodiode gelenkt und hier in ein elektrisches Plus-Minus-Signal (x-y) umgewandelt.

Es kommt dabei darauf an, die geringen Amplituden der Schwingungen so in auswertbare Größen zu verstärken, daß die Meßgenauigkeit ohne Phasen- oder Amplitudenverfälschung bis zu Anregungsfrequenzen von 20 bis 30 kHz erhalten bleibt.

Bei einem registrierten Schwingungsbild im Frequenzbereich von einigen kHz ist die exakte Definition des *Mündungsdurchgangs* entscheidend. Zu diesem Zweck wird ein Röntgenblitzgerät 7 so in der Nähe der Mündung aufgebaut, daß die beim Geschoßaustritt getriggerte Anlage Rohr- und Geschoßlage auf dem Röntgenfilm 8 bildlich festhält.

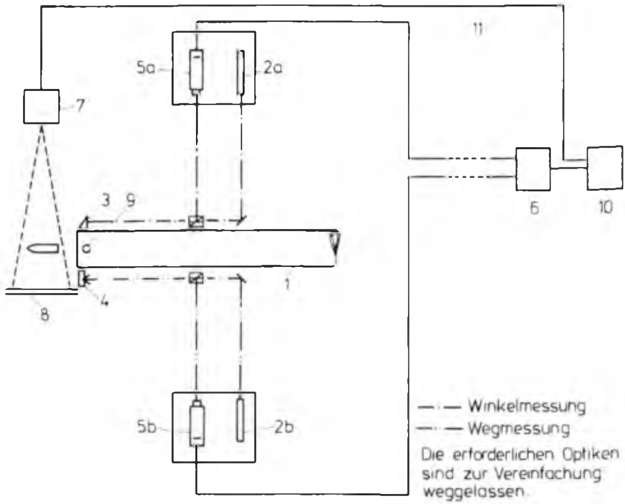


Bild 1420. *Optisch-elektrische Winkel- und Wegmessung am Waffenrohr; grundsätzliche Anordnung.*

1 Waffenrohr
2 Lichtquelle (Laser)
  2a für Winkel
  2b für Weg
3 Planspiegel an der Rohrmündung
4 Tripelspiegel an der Rohrmündung
5 a und b Aufnahmekameras
6 Steuergerät und Verstärker
7 Röntgenblitzgerät
8 Röntgenfilm
9 Triggerquarz
10 Registriergerät
11 Rückmeldung

Die Triggerung erfolgt bei Beaufschlagung des Quarzes 9 durch den Mündungsgasdruck, wenn das Geschoß das Rohr verlassen hat. Aus der Kenntnis der Rohr- und Geschoßlage, des Geschoßschwerpunktes, der Führungsbänder usw. läßt sich der genaue Austrittspunkt bestimmen. Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Zuordnung von Röntgenbild und Registrierfilm genau stimmt; dazu wird die Rückmeldung 11 der Röntgenblitzanlage auf dem Registrierfilm (Bild 1421) mit aufgezeichnet.

14.4.2. Messen des Knalldruckes

Die Expansion der Pulvergase an der Rohrmündung beim Austritt eines Geschosses erzeugt eine Druckwelle mit kurzzeitigem Anstieg, die sich als *Knalldruck* ausweitet. Abgesehen davon, daß sie das Geschoß beeinflußt, belästigt oder schädigt sie die Geschützbedienung.

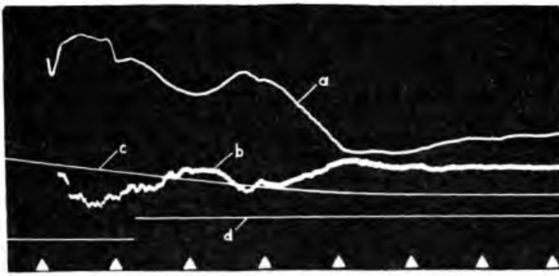


Bild 1421. *Optische Winkel- und Wegmessung, Registrierbeispiel für eine Ebene (y);*
a Weg, b Winkel, c Rücklauf, d Rückmeldung (Mündungsdurchgang).

Eine einmalige Knalleistung mit einer Wirkzeit im Nanosekundenbereich kann bereits gesundheitsschädigend sein, während ein Druck gleicher Größe bei langsamerer Anstiegszeit völlig ungefährlich ist.

Endgültige medizinische Ergebnisse liegen bisher nicht vor.

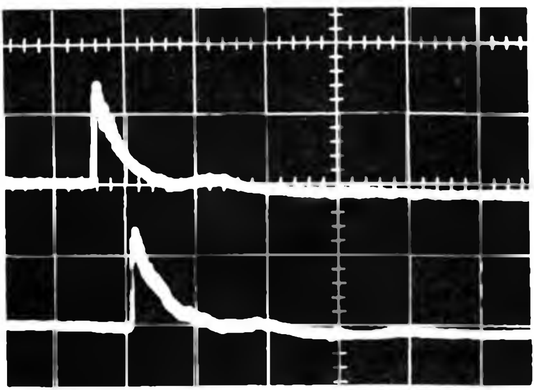


Bild 1422. *Knalldruckmessung, Registrierbeispiel.*

Die Untersuchungen des Geschützknalls erstrecken sich auf das Messen des Maximaldruckes und des Verlaufes der Knallwelle. Die speziell hierfür entwickelte Meßanordung besteht aus zwei Meßwertaufnehmern (Druckmeßquarze hoher Eigenfrequenz), die räumlich hintereinander in einem festgelegten Abstand (Meßstrecke) in Radialrichtung zur Stoß-

frontquelle (Rohrmündung) angeordnet sind. Die Aufzeichnung erfolgt mit einem Kathodenstrahloszillographen und einem Counter. Der Counter ermittelt die Zeit, mit der die Stoßfront die Meßstrecke durchläuft. Der Oszillograph zeichnet den Druckverlauf der Knallwelle auf, woraus die Steilheit, der Maximaldruck und andere charakteristische Merkmale entnommen werden können (Bild 1422). Auf diese Weise wird das gesamte Isobarenfeld vermessen (Bild 1423).

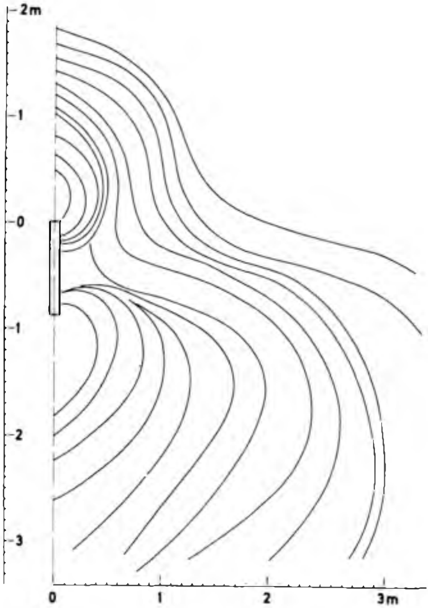


Bild 1423. *Knalldruckmessung; Isobarenfeld einer Düsenkanone.*

14.5. Messungen zur Endballistik

Endballistische Messungen erstrecken sich auf das Treffbild, die Durchschlagsleistung sowie die Splitterwirkung von Geschossen im Ziel.

14.5.1. Vermessen des Treffbildes

Bei vielen Beschüssen ist die Aufnahme eines Treffbildes erforderlich, so u.a. bei Lebensdauerbeschüssen von Maschinenkanonen.

Die konventionelle Methode, nämlich das Aufhängen (und Wiederabnehmen) von Schießscheiben, ist zeitraubend, kostspielig und u.U. gefährlich. Außerdem kann ein damit gewonnenes Treffbild nur eine Teilinformation geben, weil die zeitliche Reihenfolge der Treffer eines Feuerstoßes darauf nicht zu erkennen ist. Zwar kann man dem abhelfen, indem man die einzelnen Geschosse unterschiedlich färbt und nach dem Durchschuß die jeweilige Trefferlage aus der verschiedenen Randfärbung der Durchschußstellen ermittelt; aber dieses Verfahren kompliziert die Schießscheibenmethode noch mehr.

Diese Nachteile werden durch das von Rheinmetall entwickelte elektronische Treffbildanzeigegerät TARGETRON vermieden; es ermittelt und registriert die Trefferlage eines Geschosses direkt, d.h. ohne Treffbildscheibe, mittels eines Lichtgitters.

Dieses *Lichtgitter* wird in einem 2,5 x 2,5 m großen quadratischen, vollkommen offenen Rahmen gebildet, der mit je 200 Licht*sendern* auf einem waagerechten und einem senkrechten Holm des Rahmens (x- und y-Achse, Bild 1424) und je 200 Licht*empfängern* auf den gegenüberliegenden Holmen bestückt ist. Das Gitter entsteht also aus 400 sich in 10 mm Abstand senkrecht kreuzenden Lichtstrahlen (Lichtschranken) mit 40 000 Lichtrasterpunkten (Koordinatenpunkten).

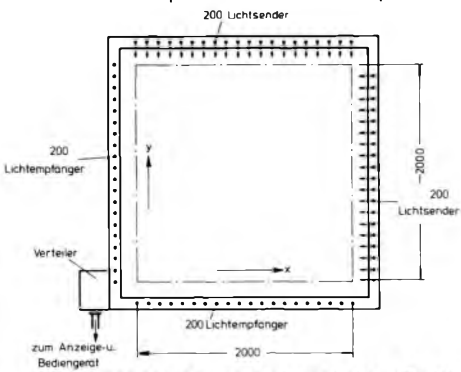


Bild 1424. *Lichtgitterrahmen des elektronischen Treffbildanzeigegerätes TARGETRON.*

Ein Geschoß, das dieses Lichtgitter durchfliegt, unterbricht je nach seinem Kaliber eine oder mehrere senkrechte und waagerechte Lichtschranken. Die von den Lichtempfängern registrierten Unterbrechungen werden gespeichert, so daß in der Zeit zwischen zwei Schüssen eines Feuerstoßes getrennt nach x- und y-Koordinaten abgefragt und auf einer Anzeigetafel der Treffpunkt des Geschosses sichtbar gemacht werden kann.

Ausgehend von der Nullstellung ermittelt die Abfrageeinrichtung denjenigen „gesetzten" Speicher, der dem Koordinatennullpunkt am nächsten liegt. Durch die Kalibervorwahl erfolgt anschließend eine Koordinatentransformation, die dem halben Durchmesser des Geschosses entspricht.

Bild 1425 zeigt die Anzeige- und Bedientafel mit dem Beispiel einer Anzeige der Durchschußkoordinaten von 12 Schuß.



Bild 1425. *Anzeige- und Bedientafel des elektronischen Treffbildanzeigegerätes TARGETRON.*

Das TARGETRON erlaubt eine Beschleunigung von Beschußprogrammen und vermindert die Unfallgefahr für das Bedienungspersonal. Durch Zusatzgeräte können weitere Registrieraufgaben gelöst werden wie Kadenz- und v_0-Messung. In dieser zweiten Ausbaustufe zeichnet ein Schnelldrucker ferner sämtliche Schußwerte mit Datum, Uhrzeit, Rhythmus-Nr., Geschütz-Nr. usw. auf Papierstreifen auf. Die Anlage entspricht dann dem anzustrebenden modernen Stand der Datenerfassung, -verarbeitung und -registrierung.

Der photoelektrische Teil der Anlage ist vollkommen vom Sonnenlicht unbeeinflußbar. Ferner ist das dynamische Verhalten der Lichtempfänger-Verstärker so berechnet, daß weder Vögel noch große Insekten beim Durchfliegen des Lichtgitters kurz vor dem Beschuß Fehlimpulse auslösen, die dann gespeichert werden könnten.

Bei der visuellen Beobachtung von Treffbildern, insbesondere bei der Abgabe einzelner Schüsse größerer Kaliber, finden vorwiegend Fernsehanlagen oder langbrennweitige Fernrohre Verwendung.

14.5.2. Messen der Durchschlagsleistung

Zur Bestimmung der Durchschlagsleistung eines Geschosses, d.h. inwieweit es ein Plattenziel durchschlagen hat, werden praktisch ausschließlich Röntgenblitzanlagen verwendet. Durch Mehrfachblitzgeräte werden die Durchdringungsgeschwindigkeiten wie auch der Zustand des Geschosses nach dem Durchdringen der Platte sichtbar gemacht (vgl. hierzu 14.7.4, Röntgenblitzgeräte).

Die nach der Durchdringung verbleibende Restenergie kann nach Auffangen der Splitter in einer beweglich angebrachten Platte durch Messung der entstehenden Plattengeschwindigkeit und der Massenbestimmung der Platte vor und nach dem Geschoßauftreffen ermittelt werden.

14.5.3. Messen der Splitterwirkung

Die Splitterwirkung eines Geschosses wird nach Abmessung, Zahl, Gewicht und Splitterdichte der bei seiner Detonation entstehenden Splitter ermittelt.

Diese Untersuchung kann sowohl mit Hilfe von Röntgenblitzaufnahmen wie auch durch Auffangen der Splitter in Sprenggruben und Splittergärten und manuelles Sortieren und Fotografieren erfolgen (s. Bild 1426) [1].

14.6. Waffentechnische Messungen

Waffentechnische Untersuchungen erstrecken sich in der Hauptsache auf die Ermittlung der Kadenz (Schußzahl je Minute) von Maschinenwaffen, die beim Schießen auftretende Rohrerwärmung und die nachfolgende Wiederabkühlung sowie das Aufzeichnen von Bewegungsvorgängen an Waffenteilen, z.B. Verschlußbewegungen, Lafettenschwingungen usw.

Bei schnell verlaufenden Lageänderungen sind vorzugsweise optische Meßmethoden anzuwenden. Bei langsamen Änderungsvorgängen finden mechanische oder mechanisch-elektrische Verfahren Anwendung.

---

[1] Vgl. auch 1.4.6.2.



bis 0,5 g

über 0,5 bis 1 g

über 1 bis 2 g

über 2 bis 3 g

über 3 bis 5 g

über 5 bis 10 g

Bild 1426. *Splitteraufnahme.*

14.6.1. Messen der Kadenz

Zur Kadenzmessung kann jeder für den Schuß charakteristische Vorgang ausgenutzt werden, z.B. Waffenrücklauf, Zündvorgang, Knall, Lichtblitz u.a. Vorwiegend werden die beim Geschoßaustritt an der Rohrmündung auftretenden Druckwellen oder die einzelnen Lichtblitze der nachverbrennenden Pulvergase herangezogen.

Beim erstgenannten Verfahren (Bild 1427) wird in der Nähe der Rohrmündung ein Schalldruckaufnehmer (Mikrofon) angeordnet, in dem die auftreffenden Druckwellen eine Membran gegen einen Kontaktbolzen drücken und elektrische Impulse auslösen; diese werden beispielsweise auf einem mit konstanter Geschwindigkeit ablaufenden Papierstreifen registriert. Aus der bekannten Ablaufgeschwindigkeit des Streifens und den Abständen der Schußmarkierungen ergibt sich die Kadenz.



Bild 1427. *Kadenzmeßgerät mit Auswertlineal.*

Bei dem Verfahren unter Ausnutzung des Mündungsblitzes wird über eine Optik mit Fotozelle der elektrische Impuls erzeugt.

14.6.2. Messen der Rohrtemperatur

Zum Messen von Maximaltemperaturen, die beim Schießen an der Außenseite des Rohres auftreten, kann man das Farbumschlagverfahren (Änderung des Farbtons aufgetragener Farbe bei Erreichen bestimmter Temperaturen) anwenden.

Zum Messen des *Temperaturverlaufs* verwendet man Thermoelemente, die für Temperaturen bis etwa 1600° C geeignet sind.

Mit Spezialthermoelementen können die Temperaturen an der Rohrinnenwand während des Schusses gemessen werden.

14.6.3. Messen von Bewegungsvorgängen

Zum Erfassen von Bewegungen bei Geschwindigkeiten bis etwa 4 m/s mit nicht zu großen Geschwindigkeitsänderungen (z.B. Rohrrückläufe, Lafettenschwingungen usw.) wendet man in der Hauptsache elektromechanische Meßwertaufnehmer und Meßwertwandler an.

Im Gegensatz zu den rein mechanischen und auch den optischen Methoden ist bei den elektromechanischen Meßverfahren die Erfassung der Meßwerte und deren Aufzeichnung mit verhältnismäßig geringem Aufwand verbunden; außerdem sind die Verfahren gegen Umwelteinflüsse wie Wetter, Licht und Temperatur unempfindlich. Allerdings be-

schränkt die mechanische Anbringung des Gebers am Meßobjekt oder die Verbindung mit dem bewegten oder schwingenden Teil den Einsatzbereich dieser Aufnehmer.

Je nach den gestellten Aufgaben werden zwei verschiedene Verfahren benutzt.

Für das Aufzeichnen von Schwingungsvorgängen werden induktive Meßwertaufnehmer bevorzugt, bei denen die Änderung einer Induktivität benutzt wird.

Ein Tauchanker wird gegenüber einem Spulensystem, das als Differentialdrossel eine Hälfte einer Wechselstrombrückenschaltung darstellt, in axialer Richtung bewegt. Dadurch ändert sich die Induktivität des Spulensystems, und die vorher abgestimmte Vollbrücke wird verstimmt. Über den Meßverstärker wird die Verstimmung als Maß der Tauchankerverschiebung registriert.

Da Verlagerung und Brückenverstimmung über einen großen Verschiebungsbereich linear reproduzierbar sind, können mit diesem Meßverfahren sowohl Rohrrückläufe bis etwa 1000 mm Länge als auch Schwingungen mit Amplituden von weniger als 1/10 mm gemessen werden.

Sehr harte Umkehrvorgänge und Prellschläge führen u.a. zu Magnetostriktionserscheinungen, die den Kurvenverlauf verfälschen.



Bild 1428. *Weg-Geber (Schichtschiebepotentiometer).*

Für das Messen massenstoßbehafteter Bewegungsvorgänge ist das Potentiometerverfahren geeigneter. Dabei wird eine an einem Schichtschiebepotentiometer (Bild 1428) anliegende Spannung über einen beweglichen Reiter je nach Stellung abgetastet. Die Aufzeichnung der Meßwerte bzw. die Darstellung der Weg-Zeit-Verläufe erfolgt zweckmäßigerweise mit Lichtstrahloszillographen. Auch hier können durch die Trägheit der bewegten Massenteile Verfälschungen des Meßwertes auftreten.

Schnellverlaufende Bewegungsvorgänge mit Geschwindigkeiten von mehr als 4 m/s (z.B. Verschlußbewegungen) können nur mit optischen

Verfahren erfaßt werden. Es haben sich hierbei zwei Methoden bewährt, das Schattenbild- oder Parallellichtverfahren und das Lichtpunktverfahren, die je nach den vorliegenden Bedingungen und Möglichkeiten angewandt werden.

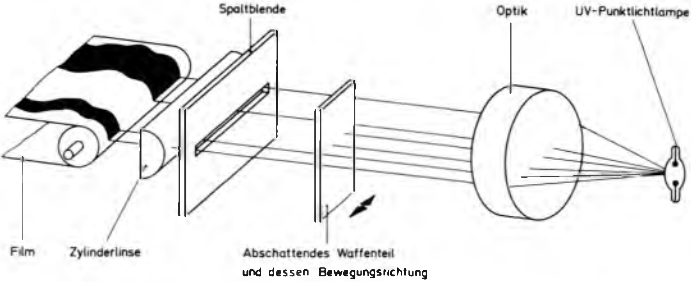


Bild 1429. *Schattenbild- oder Parallellichtverfahren, grundsätzliche Anordnung.*

Beim *Schattenbildverfahren* (Bilder 1429 und 1430) wird die Bewegung eines Waffenteils als Schattenkontur auf einem Film aufgezeichnet. Eine Punktlichtlampe (Quecksilberdampf-Hochdrucklampe, Brennfleck etwa 0,3 mm ϕ), die im Brennpunkt einer langbrennweitigen Optik (Fraunhofer-Achromat, Brennweite 1000 mm) angeordnet ist, erzeugt paralleles Licht. In möglichst kurzem Abstand vom Objekt wird eine Schattenkontur des zu untersuchenden Waffenteils in einer Aufnahmekamera aufgefangen und durch eine Zylinderlinse als Brennlinie auf dem senkrecht zur Bewegungsrichtung des Teiles ablaufenden Film abgebildet. Gleichzeitig aufbelichtete Zeitmarken gestatten eine exakte Auswertung der Bewegung des betreffenden Waffenteiles.

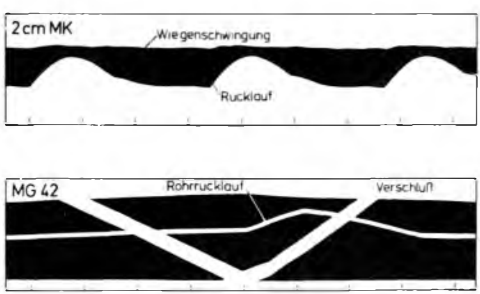


Bild 1430. *Parallellichtverfahren, Bewegungsvorgänge an einer 2-cm-Maschinenkanone (oben) und an einem MG 42 (unten).*

Die Registriermethode zeichnet sich durch exakte Darstellung im Maßstab 1:1 aus, die ein schnelles und genaues Messen ermöglicht; sie ist jedoch auf die Aufzeichnung kurzer Wege beschränkt. Ferner können damit nur dann Registrierungen durchgeführt werden, wenn die zu untersuchenden Waffenteile oder zusätzlich angebrachte Marken in das Lichtband hineinragen und zur Schattenprojektion in der Registrierkamera herangezogen werden können. Häufig sind dazu Waffendurchbrüche notwendig.

Sind die zu registrierenden Wegstrecken größer als mit Parallellichtgeräten erfaßbar oder sind Durchbrüche in der Waffe nicht zulässig, findet das *Lichtpunktverfahren* Anwendung (Bilder 1431 bis 1434).

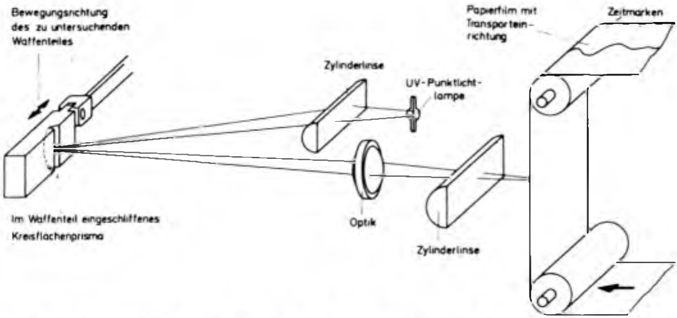


Bild 1431. *Lichtpunktverfahren, grundsätzliche Anordnung.*

Bei diesem System wird die Reflexion eines Lichtbündels an einer Schliffmarke des bewegten Waffenteiles zu Hilfe genommen. Eine Punktlichtlampe (Quecksilberdampf-Hochdrucklampe) erzeugt über eine Zylinderlinse im Meßbereich des zu untersuchenden Waffenteiles ein intensives Lichtband. Am Waffenteil selbst wird eine gut reflektierende Marke eingeschliffen, die bei der Anstrahlung einen Lichtfächer reflektiert. Dieser wird über eine Optik abgebildet und mittels einer extrem kurzbrennweitigen Zylinderlinse, die direkt vor dem ablaufenden Film liegt, als Lichtpunkt auf dem Film aufgezeichnet.

Der Film läuft senkrecht zur Bewegungsrichtung des Waffenteiles ab, die Filmgeschwindigkeit wird durch eine eingeblendete Zeitmarke markiert. Toleranzen in der Führung des Waffenteils, die zu Kippbewegungen senkrecht zur Hauptbewegungsrichtung und damit zu unterschiedlicher Strichstärke im Diagramm führen würden, werden durch die Ausbildung der Schliffmarke als Kreisflächenprisma ausgeglichen. Bedingt durch die optische Abbildung ist der Aufzeichnungsmaßstab von der Objektivbrennweite und dem Aufnahmeabstand abhängig.

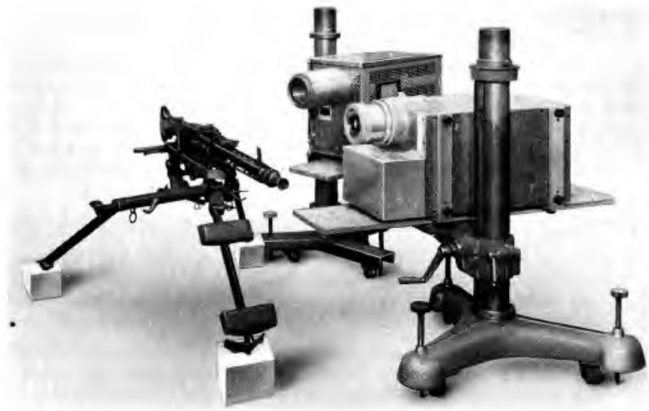


Bild 1432. *Lichtpunktverfahren, experimenteller Aufbau.*



Bild 1433. *Rheinmetall-Universalkamera mit Objektivtubus für das Lichtpunktverfahren.*

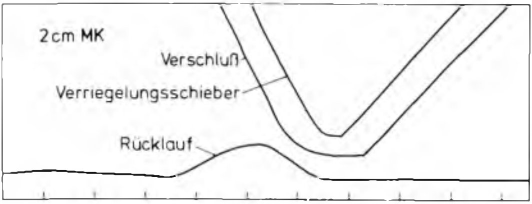


Bild 1434. *Rheinmetall-Lichtpunktverfahren, Bewegungsvorgänge an einer 2-cm-Maschinenkanone.*

14.6.4. Messen von Materialbeanspruchungen

Für die Ermittlung von Spannungen und Kräften in Bauteilen wird die unter Belastung auftretende elastische Dehnung oder die Kraft im Teil mit Dehnungs- oder Kraftmeßeinrichtungen gemessen. Aus dem Meßergebnis wird entsprechend dem Hookeschen Gesetz die Größe der auftretenden Spannungen oder Kräfte bestimmt.

Bei dem früher in der Waffentechnik angewandten Ritzverfahren wird die Längenänderung Δ l einer ausgewählten Meßstrecke am Werkstück mit Diamanten in einen Glaskörper eingeritzt.

Neben anderen noch bekannten Verfahren, wie z.B. Reißlack-, spannungsoptischen, Röntgen- oder Piezo-Verfahren, wird heute hauptsächlich das Dehnungsmeßstreifen-Verfahren (DMS) angewandt. Der *DMS-Meßwertgeber* besteht aus einem Isolierstoffträger, auf den ein dünner Metalldraht oder eine dünne Metallfolie fest aufgebracht ist. Er wird auf das zu untersuchende Waffenteil aufgeklebt (Bild 1435). Bei Belastung ändert sich der Querschnitt und damit der Ohmsche Widerstand des Leiters. Die Änderung des elektrischen Widerstandes ist das Maß für die Dehnung. Das Messen der Widerstandsänderung erfolgt mit Hilfe einer der beschriebenen Meßeinrichtungen (s. 14.6.3).

Das Meßverfahren eignet sich in gleicher Weise zur Bestimmung statischer Spannungen wie auch für dynamische Untersuchungen.



Bild 1435. *Dehnungsmeßstreifen auf einem Waffenteil.*

14.6.5. Messen von Rückstoßkräften

Zum Bestimmen der Rückstoßkraft eines Geschützes mißt man die Bremskraft der Flüssigkeitsbremse als Hauptanteil der Rückstoßkraft entweder mechanisch mit einem Federindikator oder elektromechanisch mit einer Kraftmeßdose. In letzterer sind Kraftmeßeinrichtungen als Meßelement zusammengefaßt. Die Registrierung erfolgt als Kraft-Weg- oder Kraft-Zeit-Diagramm.

Beim *Federindikator* wirkt der Druck der Bremsflüssigkeit auf einen Kolben, dessen Kolbenstange mit einer Stabfeder verbunden ist. Der Federweg wird über ein Schreibzeug auf einer papierbespannten Trommel aufgeschrieben. Beim Kraft-Weg-Diagramm wird die Trommel in Abhängigkeit vom Rohrrücklauf gedreht. Damit läßt sich für jeden Punkt des Rücklaufweges der zugehörige Druck im Bremszylinder ablesen.

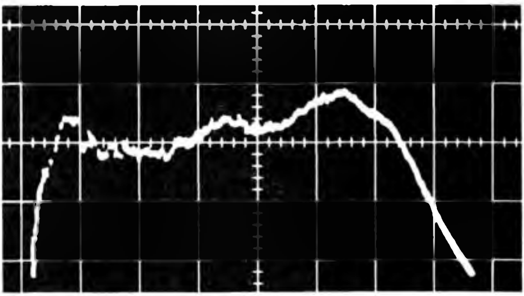


Bild 1436. *Mit Kathodenstrahloszillograph aufgenommenes Kraft-Weg-Diagramm.*

Bei Druckstößen treten im Indikator durch die Massenträgheit seiner bewegten Teile Schwingungen auf, die das Diagramm verfälschen und damit die Auswertung erschweren. Bei Verwendung elektromechanischer (höherfrequenter) Meßwertaufnehmer werden diese Schwierigkeiten vermieden. Bei Rheinmetall werden Kraft-Weg-Diagramme mit dem Kathodenstrahloszillographen geschrieben (s. Bild 1436). Als Meßwertaufnehmer für die Kraft dient dabei eine Meßdose, die in den Druckraum der Flüssigkeitsbremse eingeschraubt wird. Der Rohrrücklaufweg wird über einen elektromechanischen Meßwertaufnehmer erfaßt (s. 14.6.3). Kraft-Zeit-Diagramme werden in bereits beschriebener Weise aufgenommen (s. 14.1).

14.7. Kurzzeitfotografie

Die Kurzzeitfotografie erstreckt sich auf die fotografische Erfassung von Vorgängen im Mikro- bis Nanosekundenbereich. Sie dient neben der bildlichen Darstellung von Vorgängen aus der Waffentechnik und der Sprengstoffphysik vorzugsweise der Fotografie fliegender Geschosse (Geschoßfotografie). Je nach der Aufgabenstellung benutzt man verschiedene Aufnahmeverfahren, zu deren Durchführung verschiedene Kameraarten, Beleuchtungseinrichtungen und optische Aufbauten verwendet werden.

14.7.1. Zeitlupenkameras

Filmkameras mit intermittierendem Filmtransport und entsprechender Belichtung während des Filmstillstandes gehören wegen der geringen sekundlichen Bildzahl und der langen Belichtungszeiten nicht zur Kurzzeitfotografie. Spezielle Zeitlupen, von denen je nach der gestellten Aufgabe Bildfolgen bis zu einer Million und mehr Bildern je Sekunde gefordert werden, arbeiten mit einem optischen Ausgleich entweder bei kontinuierlich durchlaufendem oder bei stehendem Film.

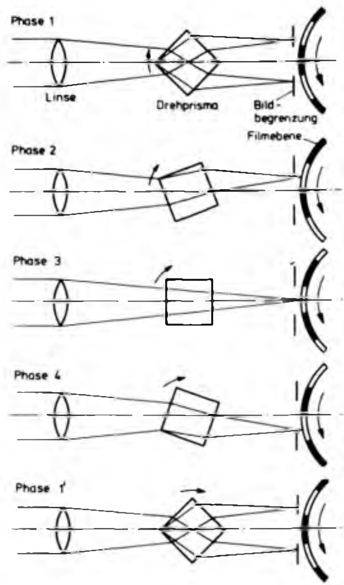


Bild 1437.
Verfahren des optischen Ausgleichs mit Drehprismen.

Bei Kameras mit kontinuierlich laufendem Film besteht der optische Ausgleich darin, dem mit hoher Geschwindigkeit (etwa 60 m/s) laufenden Film das Bild mit optischen Mitteln so nachzuführen, daß es während der Belichtungszeit auf dem Film stillsteht. Dies wird über Spiegelräder oder vorzugsweise Drehprismen erreicht, die zwischen Aufnahmeoptik und Film liegen und sich synchron mit der Filmtransportrolle drehen. Das Bild wird also durch die Brechung der einfallenden Strahlen im Prisma und die je nach seiner Stellung bewirkte Ablenkung nachgeführt. Die Prismenkante ergibt die Bildtrennlinie (Bild 1437 und 1438).

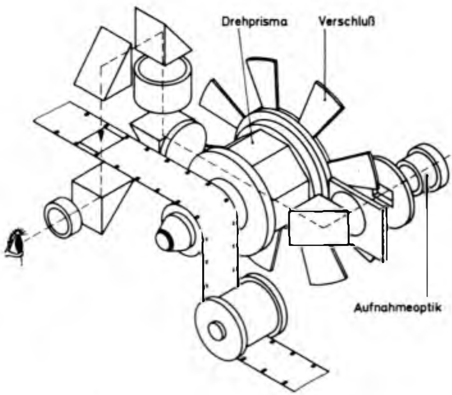


Bild 1438. *Zeitlupenkamera „Hycam" mit Mehrflächenprisma; grundsätzlicher Aufbau.*

Es finden vorzugsweise Vierflächenprismen Verwendung, die bei einer Bildgröße von 7 x 10 mm auf einem 16-mm-Film bis etwa 8000 Bilder je Sekunde ergeben. Reichen kleinere Bildhöhen aus, so können mit acht- oder sechzehnflächigen Prismen bis zu 30000 Bilder in der Sekunde erzielt werden. Die Bildhöhen betragen dann jedoch nur noch etwa 2 mm, so daß der Einsatz solcher Kameras auf Sonderfälle beschränkt bleibt.

Unter gewissen Umständen kommt es weniger auf eine hohe Bildzahl als auf möglichst kurz belichtete Bilder zur Erzielung großer Bildschärfe an. Da bei den vorgenannten Kameras die Belichtungszeit zwangsläufig von der Bildfrequenz abhängt, wird der optische Ausgleich mit einer Art Schlitzverschluß kombiniert, wodurch Belichtungszeiten bis in den Mikrosekundenbereich erzielt werden.

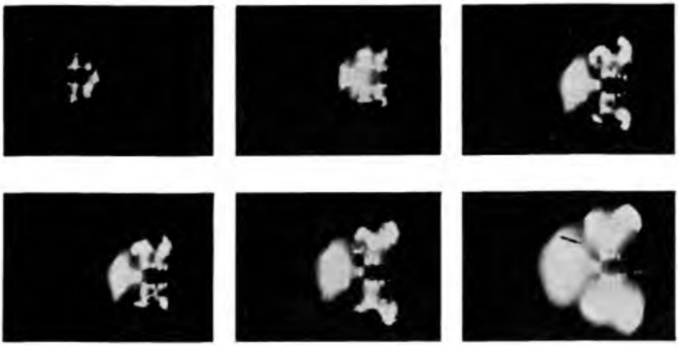


Bild 1439. *Aufnahme mit einer Zeitlupenkamera: Gasaustritt an einer Mündungsbremse (Frequenz etwa 5000 bis 6000 Bilder je Sekunde).*

Die bei den Zeitlupenkameras verwendeten Bildformate von 7 x 10 mm sind für ballistische Untersuchungen zuweilen ungeeignet, so daß besondere Kameras, als „ballistische Kameras" bekannt, mit Bildformaten von 4 x 60 mm für 70 mm breiten Film entwickelt wurden. Bildfolgen von etwa einer Million und mehr Bildern je Sekunde bei entsprechend kurzen Belichtungszeiten lassen sich bei derartigen Kameras bei laufendem Film jedoch nicht mehr darstellen. Nach einem von Rheinmetall im Jahre 1944 vorgeschlagenen Prinzip wurden daher die nachstehend beschriebenen Drehspiegelkameras entwickelt (Bild 1440) [12].

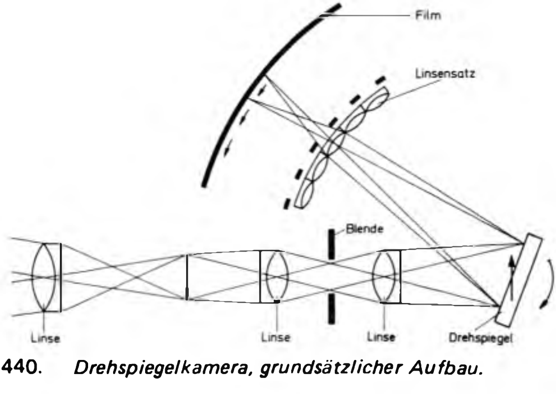


Bild 1440. *Drehspiegelkamera, grundsätzlicher Aufbau.*

Ein reelles Bild des zu untersuchenden Objektes wird auf einem Drehspiegel entworfen. Dieses Bild wird je nach Winkelstellung des Spiegels von einem Objektiv des Objektivkranzes auf den ruhenden Film abgebildet. Die Anzahl der Bilder wird durch die Zahl der Objektive bestimmt. Der Drehspiegel wird durch eine Turbine angetrieben. Man erreicht mit dieser Anordnung Bildfolgen bis zu 20 Millionen Bilder je Sekunde (Bild 1441).

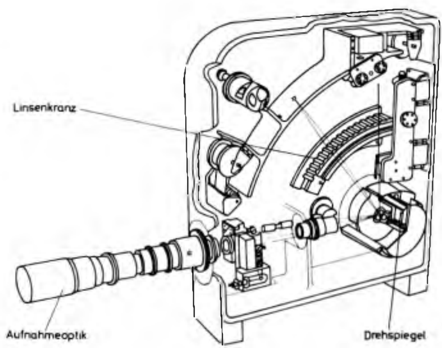


Bild 1441. *Drehspiegelkamera Barr & Stroud Ltd.*

14.7.2. Kompensationskameras

Die Kompensationskamera benutzt zum optischen Ausgleich das Verfahren der Geschwindigkeitskompensation. Die Filmgeschwindigkeit wird dabei im Verhältnis des optischen Abbildungsmaßstabes der Geschoßgeschwindigkeit so angepaßt, daß die Relativgeschwindigkeit zwischen Geschoß und Film Null wird und beim Durchgang des Geschosses durch den Aufnahmebereich der Kamera auf dem Film ein stehendes Bild entsteht.

Um die Kompensationsbedingung zu erfüllen, lassen sich bei gegebener Geschoßgeschwindigkeit v_G sowohl die Filmgeschwindigkeit v_F, die Gegenstandsweite a und die Bildweite b als auch, bei Verwendung einer Variooptik, die Brennweite f verändern und, wie folgt, bestimmen:

Für eine Linse gilt die Beziehung

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \qquad (3)$$

wegen ähnlicher Geometrie außerdem

$$\frac{v_G}{v_F} = \frac{a}{b}; \qquad (4)$$

aus beiden Gleichungen folgt für die variable Brennweite f damit die Bedingung

$$f = \frac{a}{\frac{v_G}{v_F} + 1} \,. \qquad (5)$$

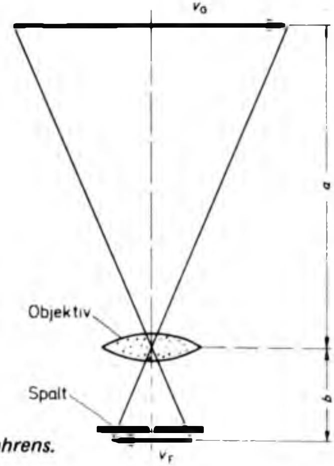


Bild 1442.
Prinzip des Kompensationsverfahrens.

Der im Bild 1442 gezeichnete Spalt; der eine Breite von 1/10 bis 2/10 mm hat, bewirkt eine kontinuierliche, in schmalen Streifen fortschreitende Abbildung des Geschosses, so daß im Zusammenhang wieder ein homogenes Bild entsteht.



Bild 1443. *Kompensationskamera, Konstruktion Rheinmetall, Modell Rh K 35/1.*

Kompensationskameras wurden speziell für die Geschoßfotografie unter Schießplatzbedingungen entwickelt (Bild 1443 bis 1445). Ihr großer Vorteil liegt darin, daß sie hervorragende Einzelinformationen und eine so außerordentlich gute Bildqualität liefern, wie sie mit den vorbeschriebenen Zeitlupenkameras nicht erreicht werden können.



Bild 1444. *Mit einer Rheinmetall-Kompensationskamera im Fluge aufgenommenes Geschoß (unmittelbar nach dem Mündungsaustritt aufgenommen; am Geschoßboden liegt die Pulvergasglocke noch an).*



Bild 1445. *Schlierenaufnahme eines fliegenden Geschosses, aufgenommen mit einer Rheinmetall-Kompensationskamera.*

Das bei dieser Aufnahmemethode erzielte *Einzel*bild reicht oft für die Erkenntnis ballistischer Vorgänge nicht aus. Aus diesem Grunde wurde von Rheinmetall eine *Serienbildkamera* entwickelt, die als wesentliches Merkmal mehrere Objektive enthält, die über einen Film größerer Breite gestaffelt angeordnet sind (Bilder 1446 und 1447).

Die Optik O_1 entwirft vom Geschoß G an der Stelle G_1 ein Bild B_1, die Optik O_2 ein entsprechendes Bild in B_2, wenn das Geschoß die Stelle G_2 erreicht hat usw. Stehen die Optiken auf gleiche Flugbahnabschnitte ausgerichtet, ergibt sich eine zeitlich gleichmäßige Bildfolge. Die Bildfrequenz wird vom Abstand der Aufnahmeorte voneinander und von der Fluggeschwindigkeit des Geschosses bestimmt. Die Zeit Δt zwischen zwei Aufnahmen ergibt sich aus $\Delta t = \Delta s/v$, worin Δs die Wegstrecke zwischen den Aufnahmeorten und v die Fluggeschwindig-

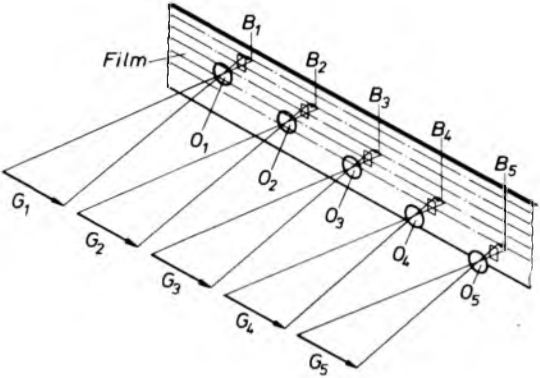


Bild 1446. *Serienbild-Kompensationskamera (Rheinmetall-Entwicklung), Prinzip.*

keit des Objektes bedeuten. Die Bildfrequenz ist dann $f = 1/\Delta t$. Das bedeutet: Je kleiner der Abstand Δs der Aufnahmeorte voneinander wird, um so höher ist die Bildfrequenz.

Mit der Rheinmetall-Mehrfachkompensationskamera können auch stereoskopische Aufnahmen gemacht werden, indem mindestens zwei, vorzugsweise drei außenliegende Objektive auf den gleichen Aufnahmeort gerichtet werden.

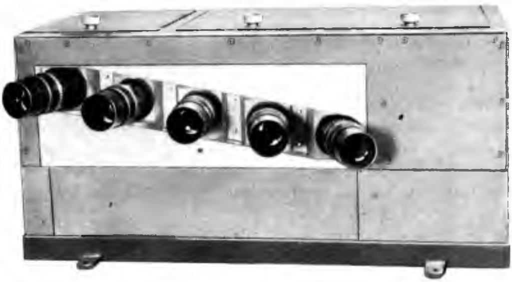


Bild 1447. *Rheinmetall-Mehrfachkompensationskamera, Modell Rh K 100/5.*

In der ausgeführten Kamera (Bild 1447) sind die Aufnahmeoptiken in verschwenkbaren Steuerköpfen untergebracht.

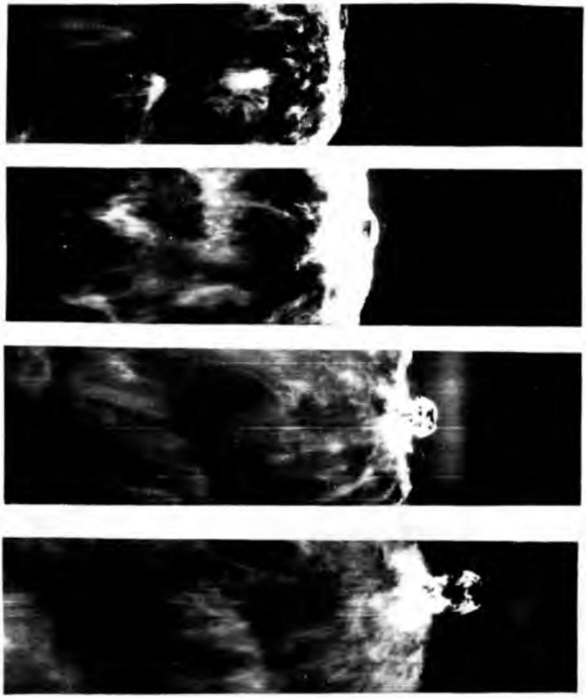


Bild 1448. *Mit einer Rheinmetall-Mehrfachkompensationskamera aufgenommenes unmittelbar vor der Mündung aus der Gaswolke austretendes Geschoß.*

Für die Aufnahmen mit Zeitlupen und Kompensationskameras werden normalerweise Dauerlichtquellen benutzt.

14.7.3. **Funkenblitzgeräte**

Extrem kurze Belichtungen, die für eine ausreichend scharfe Abbildung fliegender Objekte oder anderer kurzzeitiger Vorgänge Voraussetzung sind, können ohne komplizierte Mechanismen mit Hilfe elektrischer Funken erreicht werden.

Die nutzbare Leuchtdauer elektrischer Funken liegt in der Größenordnung von Nanosekunden. Da der Funke außerdem eine sehr geringe räumliche Ausdehnung besitzt, stellt er zusätzlich eine ideale Punktlichtquelle dar, die für spezielle Aufnahmetechniken geeignet ist.

In der Ausführung als Funkenzeitlupe (Bild 1449) werden eine Reihe von Funkenstrecken, die in einer Ebene neben- und untereinander angeordnet sind, nacheinander gezündet. Jede Funkenstrecke F_1, F_2, . . . wird durch eine Optik auf je einem zugeordneten Objektiv O_1, O_2, . . . abgebildet, so daß eine der Zahl der Funkenstrecken entsprechende Anzahl getrennter Bilder B_1, B_2, . . . des zu untersuchenden Vorganges entsteht (Prinzip der optischen Bildtrennung nach Cranz-Schardin). Die Funkenspannung beträgt 10 kV, die Auslösung wird elektronisch gesteuert. Bei der 24fach-Funkenstrecke nach Cranz-Schardin beträgt die maximale Steuerfrequenz 1 MHz, das bedeutet 24 Bilder mit einer Bildfolge von einer Million je Sekunde.

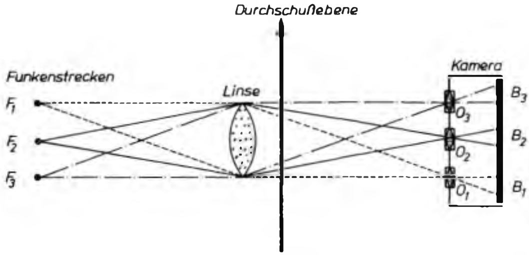


Bild 1449. *Cranz-Schardinsche Funkenzeitlupe, grundsätzlicher Aufbau.*

14.7.4. Röntgenblitzgeräte

Röntgenblitzgeräte dienen zur Aufnahme von verdeckten oder unsichtbaren Gegenständen oder Vorgängen, z.B. Geschossen im Feuerball oder in Rauchschwaden, Geschossen im Rohr oder Vorgängen im Inneren von Zündern.

Die Anwendung von Röntgenstrahlen ist bisher die einzige Möglichkeit, solche Vorgänge bildhaft zu erfassen. Das Filmmaterial kann dabei in geschlossenen Kassetten untergebracht werden, die das sichtbare Licht abhalten, während die Röntgenstrahlen sie durchdringen. Die Röntgenblitzfotografie kann nur graduierte Schattenbilder liefern.

Eine für die Röntgenblitzfotografie entwickelte Röntgenröhre wird mit einem Impuls bis etwa 1,2 MW und einer Zeitdauer im Nanosekundenbereich sowie mit Stromstärken bis etwa 5000 A betrieben. Zum Er-

zeugen dieser enorm hohen Impulsleistung wird ein bis auf etwa 50 kV aufgeladener Kondensator auf einen Stoßspannungsgenerator, den Pulser (kaskadenförmig aufgebauter Induktionskreis zur Spannungsvervielfachung), entladen. Für jeden Röntgenblitz sind je ein Pulser und eine Röntgenröhre erforderlich; für Zeitlupenaufnahmen werden mehrere Röntgenblitzgeräte nacheinander ausgelöst (Bild 1450).



Bild 1450. *Röntgenblitzanlage (Werkfoto Field Emission).*

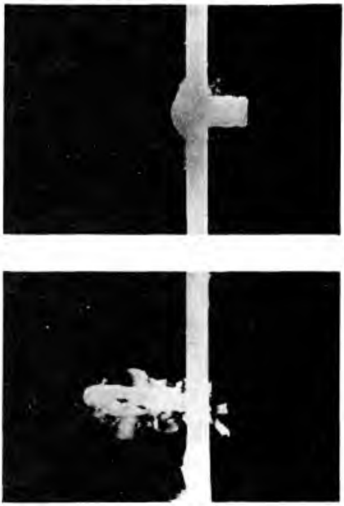


Bild 1451.
Röntgenblitzaufnahme bei einem Plattendurchschuß.

Literatur

[1] Siebel, E.: Handbuch der Werkstoffprüfung. Bd. I: Prüf- und Meßeinrichtungen. Berlin 1958. Bd. II: Die Prüfung der metallischen Werkstoffe. Berlin 1955.

[2] Riebensahm, P.; Schmidt, P.W.: Werkstoffprüfung (Metalle). 6. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York 1965 (Heft 34 der Werkstattbücher).

[3] Glocker, R.: Materialprüfung mit Röntgenstrahlen. 4. Aufl. Berlin 1958.

[4] Vollrath, K.; Thomer, G. (Hrsg.): Kurzzeitphysik. Wien 1967.

[5] Deutsch, R.: Systems Analysis Techniques. Englewood Cliffs, N.Y. 1969.

[6] Digitale Meßwerterfassung und -übertragung. Vortragsreihe Nr. 40, Techn. Universität Berlin 1969, Brennpunkt Kybernetik, Fortgeschrittenenstudienprogramm.

[7] Skolnik, M.I.: Introduction to Radar-Systems. New York 1962.

[8] Koch, B.: Ein Doppler-Radargerät für die ballistische Meßtechnik. Wehrt. Monatsh. 55 (1958), S. 468.

[9] Koch, B.: Ein radioelektrisches v_0- und cw-Meßgerät mit digitaler Meßwertanzeige. Wehrt. Monatsh. 56 (1959), S. 5.

[10] Koch, B., u.a.: Ein v_0-Radar-Gerät für den Truppengebrauch. Wehrt. Monatsh. 63 (1966), S. 524.

[11] Koch, B.; Schultze, G.: Messung der Geschoßbewegung im Lauf mit Hilfe von Mikrowellen. Wehrt. Monatsh. 59 (1962), S. 241.

[12] Vollrath, K.: Kurzzeitphotographie und HF-Kinematographie. Jahrb. d. Wehrt. 1967, Folge 2, S. 54.

15. Tabellen

15.1. Mathematische Beziehungen und Tabellen

15.1.1. Die Zahlen π und e

π (Ludolphsche Zahl, Verhältnis des Kreisumfangs zum Durchmesser)
= 3,14159265359.

e (Eulersche Zahl, Grundzahl der natürlichen Logarithmen)
= 2,71828182846.

Häufig vorkommende Ausdrücke von π und e sowie deren natürliche und dekadische (Briggssche) Logarithmen

z		ln z	lg z	z		ln z	lg z
e	2,718 28	1	0,434 29	$\frac{1}{e}$	0,367 88	0,000 00-1	0,565 71-1
π	3,141 59	1,144 73	0,497 15	$\frac{1}{\pi}$	0,318 31	0,855 27-2	0,502 85-1
2π	6,283 19	1,837 88	0,798 18	$\frac{1}{2\pi}$	0,159 15	0,162 12-2	0,201 82-1
$\frac{4}{3}\pi$	4,188 79	1,432 41	0,622 09	$\frac{3}{4\pi}$	0,238 73	0,567 59-2	0,377 91-1
$\frac{\pi}{2}$	1,570 80	0,451 58	0,196 12	$\frac{2}{\pi}$	0,636 62	0,548 32-1	0,803 88-1
$\frac{\pi}{3}$	1,047 20	0,046 12	0,020 03	$\frac{3}{\pi}$	0,954 93	0,953 88-1	0,979 97-1
$\frac{6}{\pi}$	1,909 86	0,647 03	0,281 00	$\frac{\pi}{6}$	0,523 60	0,352 97-1	0,719 00-1
π^2	9,869 60	2,289 46	0,994 30	$\frac{1}{\pi^2}$	0,101 32	0,710 54-1	0,005 70-1
$\sqrt{\pi}$	1,772 45	0,572 36	0,248 57	$\frac{1}{\sqrt{\pi}}$	0,564 19	0,427 64-1	0,751 43-1
$\sqrt[3]{\pi}$	1,464 59	0,381 58	0,165 72	$\frac{1}{\sqrt[3]{\pi}}$	0,682 78	0,618 42-1	0,834 28-1

15.1.2. Winkelfunktionen

Winkelfunktionen in den vier Quadranten

	Winkel x			
	$\pm\alpha$	$90^\circ \pm \alpha$	$180^\circ \pm \alpha$	$270^\circ \pm \alpha$
sin x	$\pm \sin\alpha$	$+ \cos\alpha$	$\mp \sin\alpha$	$- \cos\alpha$
cos x	$+ \cos\alpha$	$\mp \sin\alpha$	$- \cos\alpha$	$\pm \sin\alpha$
tan x	$\pm \tan\alpha$	$\mp \cot\alpha$	$\pm \tan\alpha$	$\mp \cot\alpha$
cot x	$\pm \cot\alpha$	$\mp \tan\alpha$	$\pm \cot\alpha$	$\mp \tan\alpha$

Funktionen zusammengesetzter Winkel

Additionstheoreme

$$\sin(x \pm y) = \sin x \cos y \pm \cos x \sin y$$

$$\cos(x \pm y) = \cos x \cos y \mp \sin x \sin y$$

$$\tan(x \pm y) = \frac{\tan x \pm \tan y}{1 \mp \tan x \tan y}$$

$$\cot(x \pm y) = \frac{\cot x \cot y \mp 1}{\cot y \pm \cot x}$$

Funktionen des doppelten Arguments

$$\sin 2x = 2 \sin x \cos x = \frac{2 \tan x}{1 + \tan^2 x}$$

$$\cos 2x = \cos^2 x - \sin^2 x = \frac{1 - \tan^2 x}{1 + \tan^2 x}$$

$$\tan 2x = \frac{2 \tan x}{1 - \tan^2 x}$$

$$\cot 2x = \frac{\cot^2 x - 1}{2 \cot x}$$

Funktionen des halben Arguments

$$\sin \frac{x}{2} = \sqrt{\frac{1 - \cos x}{2}}$$

$$\cos \frac{x}{2} = \sqrt{\frac{1 + \cos x}{2}}$$

$$\tan \frac{x}{2} = \frac{\sin x}{1 + \cos x} = \frac{1 - \cos x}{\sin x}$$

$$\cot \frac{x}{2} = \frac{\sin x}{1 - \cos x} = \frac{1 + \cos x}{\sin x}$$

Beziehungen zwischen Winkelfunktionen

	sin x	cos x	tan x	cot x
sin x		$\sqrt{1-\cos^2 x}$	$\frac{\tan x}{\sqrt{1+\tan^2 x}}$	$\frac{1}{\sqrt{1+\cot^2 x}}$
cos x	$\sqrt{1-\sin^2 x}$		$\frac{1}{\sqrt{1+\tan^2 x}}$	$\frac{\cot x}{\sqrt{1+\cot^2 x}}$
tan x	$\frac{\sin x}{\sqrt{1-\sin^2 x}}$	$\frac{\sqrt{1-\cos^2 x}}{\cos x}$		$\frac{1}{\cot x}$
cot x	$\frac{\sqrt{1-\sin^2 x}}{\sin x}$	$\frac{\cos x}{\sqrt{1-\cos^2 x}}$	$\frac{1}{\tan x}$	

Winkelfunktionen (Grad)

	sin							
	0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
0	0,00000	0,00291	0,00582	0,00873	0,01164	0,01454	0,01745	89
1	0,01745	0,02036	0,02327	0,02618	0,02908	0,03199	0,03490	88
2	0,03490	0,03781	0,04071	0,04362	0,04653	0,04943	0,05234	87
3	0,05234	0,05524	0,05814	0,06105	0,06395	0,06685	0,06976	86
4	0,06976	0,07266	0,07556	0,07846	0,08136	0,08426	0,08716	85
5	0,08716	0,09005	0,09295	0,09585	0,09874	0,10164	0,10453	84
6	0,10453	0,10742	0,11031	0,11320	0,11609	0,11898	0,12187	83
7	0,12187	0,12476	0,12764	0,13053	0,13341	0,13629	0,13917	82
8	0,13917	0,14205	0,14493	0,14781	0,15069	0,15356	0,15643	81
9	0,15643	0,15931	0,16218	0,16505	0,16792	0,17078	0,17365	80
10	0,17365	0,17651	0,17937	0,18224	0,18509	0,18795	0,19081	79
11	0,19081	0,19366	0,19652	0,19937	0,20222	0,20507	0,20791	78
12	0,20791	0,21076	0,21360	0,21644	0,21928	0,22212	0,22495	77
13	0,22495	0,22778	0,23062	0,23345	0,23627	0,23910	0,24192	76
14	0,24192	0,24474	0,24756	0,25038	0,25320	0,25601	0,25882	75
15	0,25882	0,26163	0,26443	0,26724	0,27004	0,27284	0,27564	74
16	0,27564	0,27843	0,28123	0,28402	0,28680	0,28959	0,29237	73
17	0,29237	0,29515	0,29793	0,30071	0,30348	0,30625	0,30902	72
18	0,30902	0,31178	0,31454	0,31730	0,32006	0,32282	0,32557	71
19	0,32557	0,32832	0,33106	0,33381	0,33655	0,33929	0,34202	70
20	0,34202	0,34475	0,34748	0,35021	0,35293	0,35565	0,35837	69
21	0,35837	0,36108	0,36379	0,36650	0,36921	0,37191	0,37461	68
22	0,37461	0,37730	0,37999	0,38268	0,38537	0,38805	0,39073	67
23	0,39073	0,39341	0,39608	0,39875	0,40141	0,40408	0,40674	66
24	0,40674	0,40939	0,41204	0,41469	0,41734	0,41998	0,42262	65
25	0,42262	0,42525	0,42788	0,43051	0,43313	0,43575	0,43837	64
26	0,43837	0,44098	0,44359	0,44620	0,44880	0,45140	0,45399	63
27	0,45399	0,45658	0,45917	0,46175	0,46433	0,46690	0,46947	62
28	0,46947	0,47204	0,47460	0,47716	0,47971	0,48226	0,48481	61
29	0,48481	0,48735	0,48989	0,49242	0,49495	0,49748	0,50000	60
30	0,50000	0,50252	0,50503	0,50754	0,51004	0,51254	0,51504	59
31	0,51504	0,51753	0,52002	0,52250	0,52498	0,52745	0,52992	58
32	0,52992	0,53238	0,53484	0,53730	0,53975	0,54220	0,54464	57
33	0,54464	0,54708	0,54951	0,55194	0,55436	0,55678	0,55919	56
34	0,55919	0,56160	0,56401	0,56641	0,56880	0,57119	0,57358	55
35	0,57358	0,57596	0,57833	0,58070	0,58307	0,58543	0,58779	54
36	0,58779	0,59014	0,59248	0,59482	0,59716	0,59949	0,60182	53
37	0,60182	0,60414	0,60645	0,60876	0,61107	0,61337	0,61566	52
38	0,61566	0,61795	0,62024	0,62251	0,62479	0,62706	0,62932	51
39	0,62932	0,63158	0,63383	0,63608	0,63832	0,64056	0,64279	50
40	0,64279	0,64501	0,64723	0,64945	0,65166	0,65386	0,65606	49
41	0,65606	0,65825	0,66044	0,66262	0,66480	0,66697	0,66913	48
42	0,66913	0,67129	0,67344	0,67559	0,67773	0,67987	0,68200	47
43	0,68200	0,68412	0,68624	0,68835	0,69046	0,69256	0,69466	46
44	0,69466	0,69675	0,69883	0,70091	0,70298	0,70505	0,70711	45
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	
	cos							

Winkelfunktionen (Grad)

	cos							
	0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
0	1,00000	1,00000	0,99998	0,99996	0,99993	0,99989	0,99985	89
1	0,99985	0,99979	0,99973	0,99966	0,99958	0,99949	0,99939	88
2	0,99939	0,99929	0,99917	0,99905	0,99892	0,99878	0,99863	87
3	0,99863	0,99847	0,99831	0,99813	0,99795	0,99776	0,99756	86
4	0,99756	0,99736	0,99714	0,99692	0,99668	0,99644	0,99619	85
5	0,99619	0,99594	0,99567	0,99540	0,99511	0,99482	0,99452	84
6	0,99452	0,99421	0,99390	0,99357	0,99324	0,99290	0,99255	83
7	0,99255	0,99219	0,99182	0,99144	0,99106	0,99067	0,99027	82
8	0,99027	0,98986	0,98944	0,98902	0,98858	0,98814	0,98769	81
9	0,98769	0,98723	0,98676	0,98629	0,98580	0,98531	0,98481	80
10	0,98481	0,98430	0,98378	0,98325	0,98272	0,98218	0,98163	79
11	0,98163	0,98107	0,98050	0,97992	0,97934	0,97875	0,97815	78
12	0,97815	0,97754	0,97692	0,97630	0,97566	0,97502	0,97437	77
13	0,97437	0,97371	0,97304	0,97237	0,97169	0,97100	0,97030	76
14	0,97030	0,96959	0,96887	0,96815	0,96742	0,96667	0,96593	75
15	0,96593	0,96517	0,96440	0,96363	0,96285	0,96206	0,96126	74
16	0,96126	0,96046	0,95964	0,95882	0,95799	0,95715	0,95630	73
17	0,95630	0,95545	0,95459	0,95372	0,95284	0,95195	0,95106	72
18	0,95106	0,95015	0,94924	0,94832	0,94740	0,94646	0,94552	71
19	0,94552	0,94457	0,94361	0,94264	0,94167	0,94068	0,93969	70
20	0,93969	0,93869	0,93769	0,93667	0,93565	0,93462	0,93358	69
21	0,93358	0,93253	0,93148	0,93042	0,92935	0,92827	0,92718	68
22	0,92718	0,92609	0,92499	0,92388	0,92276	0,92164	0,92050	67
23	0,92050	0,91936	0,91822	0,91706	0,91590	0,91472	0,91355	66
24	0,91355	0,91236	0,91116	0,90996	0,90875	0,90753	0,90631	65
25	0,90631	0,90507	0,90383	0,90259	0,90133	0,90007	0,89879	64
26	0,89879	0,89752	0,89623	0,89493	0,89363	0,89232	0,89101	63
27	0,89101	0,88968	0,88835	0,88701	0,88566	0,88431	0,88295	62
28	0,88295	0,88158	0,88020	0,87882	0,87743	0,87603	0,87462	61
29	0,87462	0,87321	0,87178	0,87036	0,86892	0,86748	0,86603	60
30	0,86603	0,86457	0,86310	0,86163	0,86015	0,85866	0,85717	59
31	0,85717	0,85567	0,85416	0,85264	0,85112	0,84959	0,84805	58
32	0,84805	0,84650	0,84495	0,84339	0,84182	0,84025	0,83867	57
33	0,83867	0,83708	0,83549	0,83389	0,83228	0,83066	0,82904	56
34	0,82904	0,82741	0,82577	0,82413	0,82248	0,82082	0,81915	55
35	0,81915	0,81748	0,81580	0,81412	0,81242	0,81072	0,80902	54
36	0,80902	0,80730	0,80558	0,80386	0,80212	0,80038	0,79864	53
37	0,79864	0,79688	0,79512	0,79335	0,79158	0,78980	0,78801	52
38	0,78801	0,78622	0,78442	0,78261	0,78079	0,77897	0,77715	51
39	0,77715	0,77531	0,77347	0,77162	0,76977	0,76791	0,76604	50
40	0,76604	0,76417	0,76229	0,76041	0,75851	0,75661	0,75471	49
41	0,75471	0,75280	0,75088	0,74896	0,74703	0,74509	0,74314	48
42	0,74314	0,74120	0,73924	0,73728	0,73531	0,73333	0,73135	47
43	0,73135	0,72937	0,72737	0,72537	0,72337	0,72136	0,71934	46
44	0,71934	0,71732	0,71529	0,71325	0,71121	0,70916	0,70711	45
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	
	sin							

Winkelfunktionen (Grad)

	tan							
	0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
0	0,00000	0,00291	0,00582	0,00873	0,01164	0,01455	0,01746	89
1	0,01746	0,02036	0,02328	0,02619	0,02910	0,03201	0,03492	88
2	0,03492	0,03783	0,04075	0,04366	0,04658	0,04949	0,05241	87
3	0,05241	0,05533	0,05824	0,06116	0,06408	0,06700	0,06993	86
4	0,06993	0,07285	0,07578	0,07870	0,08163	0,08456	0,08749	85
5	0,08749	0,09042	0,09335	0,09629	0,09923	0,10216	0,10510	84
6	0,10510	0,10805	0,11099	0,11394	0,11688	0,11983	0,12278	83
7	0,12278	0,12574	0,12869	0,13165	0,13461	0,13758	0,14054	82
8	0,14054	0,14351	0,14648	0,14945	0,15243	0,15540	0,15838	81
9	0,15838	0,16137	0,16435	0,16734	0,17033	0,17333	0,17633	80
10	0,17633	0,17933	0,18233	0,18534	0,18835	0,19136	0,19438	79
11	0,19438	0,19740	0,20042	0,20345	0,20648	0,20952	0,21256	78
12	0,21256	0,21560	0,21864	0,22169	0,22475	0,22781	0,23087	77
13	0,23087	0,23393	0,23700	0,24008	0,24316	0,24624	0,24933	76
14	0,24933	0,25242	0,25552	0,25862	0,26172	0,26483	0,26795	75
15	0,26795	0,27107	0,27419	0,27732	0,28046	0,28360	0,28675	74
16	0,28675	0,28990	0,29305	0,29621	0,29938	0,30255	0,30573	73
17	0,30573	0,30891	0,31210	0,31530	0,31850	0,32171	0,32492	72
18	0,32492	0,32814	0,33136	0,33460	0,33783	0,34108	0,34433	71
19	0,34433	0,34758	0,35085	0,35412	0,35740	0,36068	0,36397	70
20	0,36397	0,36727	0,37057	0,37388	0,37720	0,38053	0,38386	69
21	0,38386	0,38721	0,39055	0,39391	0,39727	0,40065	0,40403	68
22	0,40403	0,40741	0,41081	0,41421	0,41763	0,42105	0,42447	67
23	0,42447	0,42791	0,43136	0,43481	0,43828	0,44175	0,44523	66
24	0,44523	0,44872	0,45222	0,45573	0,45924	0,46277	0,46631	65
25	0,46631	0,46985	0,47341	0,47698	0,48055	0,48414	0,48773	64
26	0,48773	0,49134	0,49495	0,49858	0,50222	0,50587	0,50953	63
27	0,50953	0,51319	0,51688	0,52057	0,52427	0,52798	0,53171	62
28	0,53171	0,53545	0,53920	0,54296	0,54673	0,55051	0,55431	61
29	0,55431	0,55812	0,56194	0,56577	0,56962	0,57348	0,57735	60
30	0,57735	0,58124	0,58513	0,58905	0,59297	0,59691	0,60086	59
31	0,60086	0,60483	0,60881	0,61280	0,61681	0,62083	0,62487	58
32	0,62487	0,62892	0,63299	0,63707	0,64117	0,64528	0,64941	57
33	0,64941	0,65355	0,65771	0,66189	0,66608	0,67028	0,67451	56
34	0,67451	0,67875	0,68301	0,68728	0,69157	0,69588	0,70021	55
35	0,70021	0,70455	0,70891	0,71329	0,71769	0,72211	0,72654	54
36	0,72654	0,73100	0,73547	0,73996	0,74447	0,74900	0,75355	53
37	0,75355	0,75812	0,76272	0,76733	0,77196	0,77661	0,78129	52
38	0,78129	0,78598	0,79070	0,79544	0,80020	0,80498	0,80978	51
39	0,80978	0,81461	0,81946	0,82434	0,82923	0,83415	0,83910	50
40	0,83910	0,84407	0,84906	0,85408	0,85912	0,86419	0,86929	49
41	0,86929	0,87441	0,87955	0,88473	0,88992	0,89515	0,90040	48
42	0,90040	0,90569	0,91099	0,91633	0,92170	0,92709	0,93252	47
43	0,93252	0,93797	0,94345	0,94896	0,95451	0,96008	0,96569	46
44	0,96569	0,97133	0,97700	0,98270	0,98843	0,99420	1,00000	45
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	
	cot							

Winkelfunktionen (Grad)

cot								
	0′	10′	20′	30′	40′	50′	60′	
0	∞	343,77371	171,88540	114,58865	85,93979	68,75009	57,28996	89
1	57,28996	49,10388	42,96408	38,18846	34,36777	31,24158	28,63625	88
2	28,63625	26,43160	24,54176	22,90377	21,47040	20,20555	19,08114	87
3	19,08114	18,07498	17,16934	16,34986	15,60478	14,92442	14,30067	86
4	14,30067	13,72674	13,19688	12,70621	12,25051	11,82617	11,43005	85
5	11,43005	11,05943	10,71191	10,38540	10,07803	9,78817	9,51436	84
6	9,51436	9,25530	9,00983	8,77689	8,55555	8,34496	8,14435	83
7	8,14435	7,95302	7,77035	7,59575	7,42871	7,26873	7,11537	82
8	7,11537	6,96823	6,82694	6,69116	6,56055	6,43484	6,31375	81
9	6,31375	6,19703	6,08444	5,97576	5,87080	5,76937	5,67128	80
10	5,67128	5,57638	5,48451	5,39552	5,30928	5,22566	5,14455	79
11	5,14455	5,06584	4,98840	4,91516	4,84300	4,77286	4,70463	78
12	4,70463	4,63825	4,57363	4,51071	4,44942	4,38969	4,33148	77
13	4,33148	4,27471	4,21933	4,16530	4,11256	4,06107	4,01078	76
14	4,01078	3,96165	3,91364	3,86671	3,82083	3,77595	3,73205	75
15	3,73205	3,68909	3,64705	3,60588	3,56557	3,52609	3,48741	74
16	3,48741	3,44951	3,41236	3,37594	3,34023	3,30521	3,27085	73
17	3,27085	3,23714	3,20406	3,17159	3,13972	3,10842	3,07768	72
18	3,07768	3,04749	3,01783	2,98869	2,96004	2,93189	2,90421	71
19	2,90421	2,87700	2,85023	2,82391	2,79802	2,77254	2,74748	70
20	2,74748	2,72281	2,69853	2,67462	2,65109	2,62791	2,60509	69
21	2,60509	2,58261	2,56046	2,53865	2,51715	2,49597	2,47509	68
22	2,47509	2,45451	2,43422	2,41421	2,39449	2,37504	2,35585	67
23	2,35585	2,33693	2,31826	2,29984	2,28167	2,26374	2,24604	66
24	2,24604	2,22857	2,21132	2,19430	2,17749	2,16090	2,14451	65
25	2,14451	2,12832	2,11233	2,09654	2,08094	2,06553	2,05030	64
26	2,05030	2,03526	2,02039	2,00569	1,99116	1,97680	1,96261	63
27	1,96261	1,94858	1,93470	1,92098	1,90741	1,89400	1,88073	62
28	1,88073	1,86760	1,85462	1,84177	1,82906	1,81649	1,80405	61
29	1,80405	1,79174	1,77955	1,76749	1,75556	1,74375	1,73205	60
30	1,73205	1,72047	1,70901	1,69766	1,68643	1,67530	1,66428	59
31	1,66428	1,65337	1,64256	1,63185	1,62125	1,61074	1,60033	58
32	1,60033	1,59002	1,57981	1,56969	1,55966	1,54972	1,53987	57
33	1,53987	1,53010	1,52043	1,51084	1,50133	1,49190	1,48256	56
34	1,48256	1,47330	1,46411	1,45501	1,44598	1,43703	1,42815	55
35	1,42815	1,41934	1,41061	1,40195	1,39336	1,38484	1,37638	54
36	1,37638	1,36800	1,35968	1,35142	1,34323	1,33511	1,32704	53
37	1,32704	1,31904	1,31110	1,30323	1,29541	1,28764	1,27994	52
38	1,27994	1,27230	1,26471	1,25717	1,24969	1,24227	1,23490	51
39	1,23490	1,22758	1,22031	1,21310	1,20593	1,19882	1,19175	50
40	1,19175	1,18474	1,17777	1,17085	1,16398	1,15715	1,15037	49
41	1,15037	1,14363	1,13694	1,13029	1,12369	1,11713	1,11061	48
42	1,11061	1,10414	1,09770	1,09131	1,08496	1,07864	1,07237	47
43	1,07237	1,06613	1,05994	1,05378	1,04766	1,04158	1,03553	46
44	1,03553	1,02952	1,02355	1,01761	1,01170	1,00583	1,00000	45
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	0′	
tan								

Winkelfunktionen (Strich)

	sin		sin		sin		sin
1	0,00098	51	0,05005	101	0,09899	151	0,14770
2	0,00196	52	0,05103	102	0,09997	152	0,14867
3	0,00295	53	0,05201	103	0,10095	153	0,14964
4	0,00393	54	0,05299	104	0,10192	154	0,15061
5	0,00491	55	0,05397	105	0,10290	155	0,15158
6	0,00589	56	0,05495	106	0,10388	156	0,15255
7	0,00687	57	0,05593	107	0,10485	157	0,15352
8	0,00785	58	0,05691	108	0,10583	158	0,15449
9	0,00884	59	0,05789	109	0,10681	159	0,15546
10	0,00982	60	0,05887	110	0,10778	160	0,15643
11	0,01080	61	0,05985	111	0,10876	161	0,15740
12	0,01178	62	0,06083	112	0,10973	162	0,15837
13	0,01276	63	0,06181	113	0,11071	163	0,15934
14	0,01374	64	0,06279	114	0,11169	164	0,16031
15	0,01473	65	0,06377	115	0,11266	165	0,16128
16	0,01571	66	0,06475	116	0,11364	166	0,16225
17	0,01669	67	0,06573	117	0,11461	167	0,16322
18	0,01767	68	0,06671	118	0,11559	168	0,16419
19	0,01865	69	0,06769	119	0,11656	169	0,16516
20	0,01963	70	0,06867	120	0,11754	170	0,16612
21	0,02062	71	0,06965	121	0,11851	171	0,16709
22	0,02160	72	0,07063	122	0,11949	172	0,16806
23	0,02258	73	0,07161	123	0,12046	173	0,16903
24	0,02356	74	0,07259	124	0,12144	174	0,16999
25	0,02454	75	0,07356	125	0,12241	175	0,17096
26	0,02552	76	0,07454	126	0,12338	176	0,17193
27	0,02650	77	0,07552	127	0,12436	177	0,17290
28	0,02749	78	0,07650	128	0,12533	178	0,17386
29	0,02847	79	0,07748	129	0,12631	179	0,17483
30	0,02945	80	0,07846	130	0,12728	180	0,17580
31	0,03043	81	0,07944	131	0,12825	181	0,17676
32	0,03141	82	0,08042	132	0,12923	182	0,17773
33	0,03239	83	0,08139	133	0,13020	183	0,17869
34	0,03337	84	0,08237	134	0,13118	184	0,17966
35	0,03435	85	0,08335	135	0,13215	185	0,18063
36	0,03534	86	0,08433	136	0,13312	186	0,18159
37	0,03632	87	0,08531	137	0,13409	187	0,18256
38	0,03730	88	0,08629	138	0,13507	188	0,18352
39	0,03828	89	0,08726	139	0,13604	189	0,18449
40	0,03926	90	0,08824	140	0,13701	190	0,18545
41	0,04024	91	0,08922	141	0,13798	191	0,18642
42	0,04122	92	0,09020	142	0,13896	192	0,18738
43	0,04220	93	0,09118	143	0,13993	193	0,18835
44	0,04318	94	0,09215	144	0,14090	194	0,18931
45	0,04416	95	0,09313	145	0,14187	195	0,19027
46	0,04515	96	0,09411	146	0,14284	196	0,19124
47	0,04613	97	0,09509	147	0,14382	197	0,19220
48	0,04711	98	0,09606	148	0,14479	198	0,19316
49	0,04809	99	0,09704	149	0,14576	199	0,19413
50	0,04907	100	0,09802	150	0,14673	200	0,19509

Winkelfunktionen Strich

	sin		sin		sin		sin
201	0,19605	251	0,24393	301	0,29122	351	0,33781
202	0,19702	252	0,24488	302	0,29216	352	0,33874
203	0,19798	253	0,24584	303	0,29310	353	0,33966
204	0,19894	254	0,24679	304	0,29404	354	0,34058
205	0,19990	255	0,24774	305	0,29498	355	0,34151
206	0,20086	256	0,24869	306	0,29592	256	0,34243
207	0,20183	257	0,24964	307	0,29685	257	0,34335
208	0,20279	258	0,25059	308	0,29779	358	0,34427
209	0,20375	259	0,25154	309	0,29873	359	0,34520
210	0,20471	260	0,25249	310	0,29967	360	0,34612
211	0,20567	261	0,25344	311	0,30060	361	0,34704
212	0,20663	262	0,25439	312	0,30154	362	0,34796
213	0,20759	263	0,25534	313	0,30247	363	0,34888
214	0,20855	264	0,25629	314	0,30341	364	0,34980
215	0,20951	265	0,25724	315	0,30434	365	0,35072
216	0,21047	266	0,25819	316	0,30528	366	0,35164
217	0,21143	267	0,25914	317	0,30621	367	0,35256
218	0,21239	268	0,26008	318	0,30715	368	0,35347
219	0,21335	269	0,26103	319	0,30808	369	0,35439
220	0,21431	270	0,26198	320	0,30902	370	0,35531
221	0,21527	271	0,26293	321	0,30995	371	0,35623
222	0,21623	272	0,26387	322	0,31088	372	0,35715
223	0,21718	273	0,26482	323	0,31182	373	0,35806
224	0,21814	274	0,26577	324	0,31275	374	0,35898
225	0,21910	275	0,26671	325	0,31368	375	0,35989
226	0,22006	276	0,26766	326	0,31461	376	0,36081
227	0,22102	277	0,26860	327	0,31555	377	0,36173
228	0,22197	278	0,26955	328	0,31648	378	0,36264
229	0,22293	279	0,27050	329	0,31741	379	0,36356
230	0,22389	280	0,27144	330	0,31834	380	0,36447
231	0,22484	281	0,27239	331	0,31927	381	0,36538
232	0,22580	282	0,27333	332	0,32020	382	0,36630
233	0,22676	283	0,27427	333	0,32113	383	0,36721
234	0,22771	284	0,27522	334	0,32206	384	0,36812
235	0,22867	285	0,27616	335	0,32299	385	0,36904
236	0,22963	286	0,27710	336	0,32392	386	0,36995
237	0,23058	287	0,27805	337	0,32485	387	0,37086
238	0,23154	288	0,27899	338	0,32577	388	0,37177
239	0,23249	289	0,27993	339	0,32670	389	0,37268
240	0,23345	290	0,28088	340	0,32763	390	0,37359
241	0,23440	291	0,28182	341	0,32856	391	0,37451
242	0,23535	292	0,28276	342	0,32948	392	0,37542
243	0,23631	293	0,28370	343	0,33041	393	0,37633
244	0,23726	294	0,28464	344	0,33134	394	0,37723
245	0,23822	295	0,28558	345	0,33226	395	0,37814
246	0,23917	296	0,28652	346	0,33319	396	0,37905
247	0,24012	297	0,28746	347	0,33412	397	0,37996
248	0,24107	298	0,28841	348	0,33504	398	0,38087
249	0,24203	299	0,28934	349	0,33597	399	0,38178
250	0,24298	300	0,29028	350	0,33689	400	0,38268

Winkelfunktionen Strich

	sin		sin		sin		sin
401	0,38359	451	0,42844	501	0,47226	551	0,51494
402	0,38450	452	0,42933	502	0,47313	552	0,51579
403	0,38540	453	0,43022	503	0,47399	553	0,51663
404	0,38631	454	0,43110	504	0,47486	554	0,51747
405	0,38721	455	0,43199	505	0,47572	555	0,51831
406	0,38812	456	0,43287	506	0,47658	556	0,51915
407	0,38902	457	0,43376	507	0,47745	557	0,51998
408	0,38993	458	0,43464	508	0,47831	558	0,52082
409	0,39083	459	0,43553	509	0,47917	559	0,52166
410	0,39173	460	0,43641	510	0,48003	560	0,52250
411	0,39264	461	0,43729	511	0,48089	561	0,52334
412	0,39354	462	0,43817	512	0,48175	562	0,52417
413	0,39444	463	0,43906	513	0,48261	563	0,52501
414	0,39534	464	0,43994	514	0,48347	564	0,52584
415	0,39625	465	0,44082	515	0,48433	565	0,52668
416	0,39715	466	0,44170	516	0,48519	566	0,52751
417	0,39805	467	0,44258	517	0,48605	567	0,52835
418	0,39895	468	0,44346	518	0,48691	568	0,52918
419	0,39985	469	0,44434	519	0,48776	569	0,53001
420	0,40075	470	0,44522	520	0,48862	570	0,53084
421	0,40165	471	0,44610	521	0,48948	571	0,53168
422	0,40255	472	0,44698	522	0,49033	572	0,53251
423	0,40345	473	0,44786	523	0,49119	573	0,53334
424	0,40434	474	0,44873	524	0,49204	574	0,53417
425	0,40524	475	0,44961	525	0,49290	575	0,53500
426	0,40614	476	0,45049	526	0,49375	576	0,53583
427	0,40704	477	0,45136	527	0,49461	577	0,53666
428	0,40793	478	0,45224	528	0,49546	578	0,53748
429	0,40883	479	0,45312	529	0,49631	579	0,53831
430	0,40972	480	0,54399	530	0,49716	580	0,53914
431	0,41062	481	0,45486	531	0,49801	581	0,53996
432	0,41151	482	0,45574	532	0,49887	582	0,54079
433	0,41241	483	0,45661	533	0,49972	583	0,54162
434	0,41330	484	0,45749	534	0,50057	584	0,54244
435	0,41420	485	0,45836	535	0,50142	585	0,54327
436	0,41509	486	0,45923	536	0,50227	586	0,54409
437	0,41598	487	0,46010	537	0,50311	587	0,54491
438	0,41688	488	0,46097	538	0,50396	588	0,54574
439	0,41777	489	0,46185	539	0,50481	589	0,54656
440	0,41866	490	0,46272	540	0,50566	590	0,54738
441	0,41955	491	0,46359	541	0,50650	591	0,54820
442	0,42044	492	0,46446	542	0,50735	592	0,54902
443	0,42133	493	0,46532	543	0,50820	593	0,54984
444	0,42222	494	0,46619	544	0,50904	594	0,55066
445	0,42311	495	0,46706	545	0,50989	595	0,55148
446	0,42400	496	0,46793	546	0,51073	596	0,55230
447	0,42489	497	0,46880	547	0,51157	597	0,55312
448	0,42578	498	0,46966	548	0,51242	598	0,55394
449	0,42667	499	0,47053	549	0,51326	599	0,55475
450	0,42755	500	0,47140	550	0,51410	600	0,55557

Winkelfunktionen Strich

	sin		sin		sin		sin
601	0,55639	651	0,59649	701	0,63515	751	0,67229
602	0,55720	652	0,59728	702	0,63591	752	0,67301
603	0,55802	653	0,59806	703	0,63667	753	0,67374
604	0,55883	654	0,59885	704	0,63742	754	0,67446
605	0,55964	655	0,59963	705	0,63818	755	0,67519
606	0,56046	656	0,60042	706	0,63894	756	0,67591
607	0,56127	657	0,60120	707	0,63969	757	0,67663
608	0,56208	658	0,60199	708	0,64044	758	0,67736
609	0,56289	659	0,60277	709	0,64120	759	0,67808
610	0,56371	660	0,60356	710	0,64195	760	0,67880
611	0,56452	661	0,60434	711	0,64270	761	0,67952
612	0,56533	662	0,60512	712	0,64346	762	0,68024
613	0,56614	663	0,60590	713	0,64421	763	0,68096
614	0,56695	664	0,60668	714	0,64496	764	0,68168
615	0,56775	665	0,60746	715	0,64571	765	0,68240
616	0,56856	666	0,60824	716	0,64646	766	0,68311
617	0,56937	667	0,60902	717	0,64721	767	0,68383
618	0,57018	668	0,60980	718	0,64795	768	0,68455
619	0,57098	669	0,61058	719	0,64870	769	0,68526
620	0,57179	670	0,61135	720	0,64945	770	0,68598
621	0,57259	671	0,61213	721	0,65019	771	0,68669
622	0,57340	672	0,61291	722	0,65094	772	0,68740
623	0,57420	673	0,61368	723	0,65168	773	0,68812
624	0,57501	674	0,61446	724	0,65243	774	0,68883
625	0,57581	675	0,61523	725	0,65317	775	0,68954
626	0,57661	676	0,61601	726	0,65392	776	0,69025
627	0,57741	677	0,61678	727	0,65466	777	0,69096
628	0,57821	678	0,61755	728	0,65540	778	0,69167
629	0,57901	679	0,61832	729	0,65614	779	0,69238
630	0,57981	680	0,61909	730	0,65688	780	0,69309
631	0,58061	681	0,61986	731	0,65762	781	0,69379
632	0,58141	682	0,62063	732	0,65836	782	0,69450
633	0,58221	683	0,62140	733	0,65910	783	0,69521
634	0,58301	584	0,62217	734	0,65984	784	0,69591
635	0,58381	685	0,62294	735	0,66057	785	0,69662
636	0,58460	686	0,62371	736	0,66131	786	0,69732
637	0,58540	687	0,62448	737	0,66205	787	0,69802
638	0,58620	688	0,62524	738	0,66278	788	0,69873
639	0,58699	689	0,62601	739	0,66352	789	0,69943
640	0,58779	690	0,62677	740	0,66425	790	0,70013
641	0,58858	691	0,62754	741	0,66499	791	0,70083
642	0,58937	692	0,62830	742	0,66572	792	0,70153
643	0,59017	693	0,62907	743	0,66645	793	0,70223
644	0,59096	694	0,62983	744	0,66718	794	0,70293
645	0,59175	695	0,63059	745	0,66791	795	0,70363
646	0,59254	696	0,63135	746	0,66864	796	0,70432
647	0,59333	697	0,63211	747	0,66937	797	0,70502
648	0,59412	698	0,63287	748	0,67010	798	0,70572
649	0,59491	699	0,63363	749	0,67083	799	0,70641
650	0,59570	700	0,63439	750	0,67156	800	0,70711

Winkelfunktionen Strich

	tan		tan		tan		tan
1	0,00098	51	0,05011	101	0,09948	151	0,14934
2	0,00196	52	0,05110	102	0,10047	152	0,15034
3	0,00295	53	0,05208	103	0,10147	153	0,15135
4	0,00393	54	0,05306	104	0,10246	154	0,15235
5	0,00491	55	0,05405	105	0,10345	155	0,15336
6	0,00589	56	0,05503	106	0,10444	156	0,15436
7	0,00687	57	0,05602	107	0,10544	157	0,15537
8	0,00785	58	0,05700	108	0,10643	158	0,15637
9	0,00884	59	0,05799	109	0,10742	159	0,15738
10	0,00982	60	0,05897	110	0,10841	160	0,15838
11	0,01080	61	0,05996	111	0,10941	161	0,15939
12	0,01178	62	0,06094	112	0,11040	162	0,16040
13	0,01276	63	0,06193	113	0,11139	163	0,16140
14	0,01375	64	0,06291	114	0,11239	164	0,16241
15	0,01473	65	0,06390	115	0,11338	165	0,16342
16	0,01571	66	0,06489	116	0,11438	166	0,16443
17	0,01669	67	0,06587	117	0,11537	167	0,16544
18	0,01767	68	0,06686	118	0,11637	168	0,16645
19	0,01866	69	0,06784	119	0,11736	169	0,16745
20	0,01964	70	0,06883	120	0,11836	170	0,16846
21	0,02062	71	0,06982	121	0,11935	171	0,16947
22	0,02160	72	0,07080	122	0,12035	172	0,17048
23	0,02258	73	0,07179	123	0,12135	173	0,17149
24	0,02357	74	0,07278	124	0,12234	174	0,17251
25	0,02455	75	0,07376	125	0,12334	175	0,17352
26	0,02553	76	0,07475	126	0,12433	176	0,17453
27	0,02651	77	0,07574	127	0,12533	177	0,17554
28	0,02750	78	0,07673	128	0,12633	178	0,17655
29	0,02848	79	0,07771	129	0,12733	179	0,17756
30	0,02946	80	0,07870	130	0,12832	180	0,17858
31	0,03044	81	0,07969	131	0,12932	181	0,17959
32	0,03143	82	0,08068	132	0,13032	182	0,18060
33	0,03241	83	0,08167	133	0,13132	183	0,18162
34	0,03339	84	0,08265	134	0,13232	184	0,18263
35	0,03437	85	0,08364	135	0,13332	185	0,19365
36	0,03536	86	0,08463	136	0,13432	186	0,18466
37	0,03634	87	0,08562	137	0,13532	187	0,18568
38	0,03732	88	0,08661	138	0,13632	188	0,18669
39	0,03831	89	0,08760	139	0,13732	189	0,18771
40	0,03929	90	0,08859	140	0,13832	190	0,18873
41	0,04027	91	0,08958	141	0,13932	191	0,18974
42	0,04126	92	0,09057	142	0,14032	192	0,19076
43	0,04224	93	0,09156	143	0,14132	193	0,19178
44	0,04322	94	0,09255	144	0,14232	194	0,19280
45	0,04421	95	0,09354	145	0,14332	195	0,19381
46	0,04519	96	0,09453	146	0,14432	196	0,19483
47	0,04617	97	0,09552	147	0,14533	197	0,19585
48	0,04716	98	0,09651	148	0,14633	198	0,19687
49	0,04814	99	0,09750	149	0,14733	199	0,19789
50	0,04913	100	0,09849	150	0,14834	200	0,19891

Winkelfunktionen Strich

	tan		tan		tan		tan
201	0,19993	251	0,25153	301	0,30442	351	0,35891
202	0,20095	252	0,25257	302	0,30549	352	0,36002
203	0,20198	253	0,25362	303	0,30657	353	0,36113
204	0,20300	254	0,25466	304	0,30764	354	0,36224
205	0,20402	255	0,25571	305	0,30872	355	0,36335
206	0,20504	256	0,25676	306	0,30979	356	0,36446
207	0,20607	257	0,25780	307	0,31087	357	0,36558
208	0,20709	258	0,25885	308	0,31194	358	0,36669
209	0,20811	259	0,25990	309	0,31302	359	0,36780
210	0,20914	260	0,26095	310	0,31410	360	0,36892
211	0,21016	261	0,26200	311	0,31518	361	0,37004
212	0,21119	262	0,26304	312	0,31626	362	0,37115
213	0,21221	263	0,26409	313	0,31734	363	0,37227
214	0,21324	264	0,26515	314	0,31842	364	0,37339
215	0,21427	265	0,26620	315	0,31950	365	0,37451
216	0,21529	266	0,26725	316	0,32058	366	0,37563
217	0,21632	267	0,26830	317	0,32167	367	0,37675
218	0,21735	268	0,26935	318	0,32275	368	0,37787
219	0,21838	269	0,27041	319	0,32383	369	0,37899
220	0,21941	270	0,27146	320	0,32492	370	0,38011
221	0,22044	271	0,27251	321	0,32601	371	0,38124
222	0,22147	272	0,27357	322	0,32709	372	0,38236
223	0,22250	273	0,27462	323	0,32818	373	0,38349
224	0,22353	274	0,27568	324	0,32927	374	0,38462
225	0,22456	275	0,27674	325	0,33036	375	0,38574
226	0,22559	276	0,27779	326	0,33144	376	0,38687
227	0,22662	277	0,27885	327	0,33253	377	0,38800
228	0,22765	278	0,27991	328	0,33363	378	0,38913
229	0,22869	279	0,28097	329	0,33472	379	0,39026
230	0,22972	280	0,28203	330	0,33581	380	0,39139
231	0,23075	281	0,28309	331	0,33690	381	0,39252
232	0,23179	282	0,28415	332	0,33799	382	0,39366
233	0,23282	283	0,28521	333	0,33909	383	0,39479
234	0,23386	284	0,28627	334	0,34018	384	0,39593
235	0,23489	285	0,28734	335	0,34128	385	0,39706
236	0,23593	286	0,28840	336	0,34238	386	0,39820
237	0,23697	287	0,28946	337	0,34347	387	0,39934
238	0,23800	288	0,29053	338	0,34457	388	0,40048
239	0,23904	289	0,29159	339	0,34567	389	0,40162
240	0,24008	290	0,29266	340	0,34677	390	0,40276
241	0,24112	291	0,29372	341	0,34787	391	0,40390
242	0,24216	292	0,29479	342	0,34897	392	0,40504
243	0,24320	293	0,29586	343	0,35007	393	0,40618
244	0,24424	294	0,29693	344	0,35117	394	0,40733
245	0,24528	295	0,29799	345	0,35228	395	0,40847
246	0,24632	296	0,29906	346	0,35338	396	0,40962
247	0,24736	297	0,30013	347	0,35449	397	0,41077
248	0,24840	298	0,30120	348	0,35559	398	0,41191
249	0,24944	299	0,30227	349	0,35670	399	0,41306
250	0,25049	300	0,30335	350	0,35781	400	0,41421

	tan		tan		tan		tan
401	0,41536	451	0,47417	501	0,53577	551	0,60071
402	0,41652	452	0,47537	502	0,53704	552	0,60205
403	0,41767	453	0,47657	503	0,53830	553	0,60339
404	0,41882	454	0,47778	504	0,53957	554	0,60473
405	0,41998	455	0,47899	505	0,54084	555	0,60607
406	0,42113	456	0,48019	506	0,54211	556	0,60741
407	0,42229	457	0,48140	507	0,54338	557	0,60876
408	0,42345	458	0,48261	508	0,54465	558	0,61010
409	0,42460	459	0,48382	509	0,54593	559	0,61145
410	0,42576	460	0,48503	510	0,54720	560	0,61280
411	0,42692	461	0,48625	511	0,54848	561	0,61415
412	0,42808	462	0,48746	512	0,54975	562	0,61550
413	0,42925	463	0,48868	513	0,55103	563	0,61686
414	0,43041	464	0,48989	514	0,55231	564	0,61822
415	0,43157	465	0,49111	515	0,55360	565	0,61957
416	0,43274	466	0,49233	516	0,55488	566	0,62093
417	0,43390	467	0,49355	517	0,55616	567	0,62229
418	0,43507	468	0,49477	518	0,55745	568	0,62366
419	0,43624	469	0,49600	519	0,55874	569	0,62502
420	0,43741	470	0,49722	520	0,56003	570	0,62539
421	0,43858	471	0,49845	521	0,56132	571	0,62639
422	0,43975	472	0,49967	522	0,56261	572	0,62912
423	0,44092	473	0,50090	523	0,56390	573	0,63050
424	0,44210	474	0,50213	524	0,56520	574	0,63187
425	0,44327	475	0,50336	525	0,56649	575	0,63324
426	0,44444	476	0,50459	526	0,56779	576	0,63462
427	0,44562	477	0,50582	527	0,56909	577	0,63600
428	0,44680	478	0,50705	528	0,57039	578	0,63738
429	0,44798	479	0,50829	529	0,57169	579	0,63876
430	0,44916	480	0,50953	530	0,57299	580	0,64014
431	0,45034	481	0,51076	531	0,57430	581	0,64153
432	0,45152	482	0,51200	532	0,57561	582	0,64291
433	0,45270	483	0,51324	533	0,57691	583	0,64430
434	0,45388	484	0,51448	534	0,57822	584	0,64569
435	0,45507	485	0,51572	535	0,57953	585	0,64708
436	0,45625	486	0,51697	536	0,58085	586	0,64848
437	0,45744	487	0,51821	537	0,58216	587	0,64987
438	0,45863	488	0,51946	538	0,58347	588	0,65127
439	0,45982	489	0,52071	539	0,58479	589	0,65267
440	0,46101	490	0,52195	540	0,58611	590	0,65407
441	0,46220	491	0,52320	541	0,58743	591	0,65547
442	0,46339	492	0,52446	542	0,58875	592	0,65688
443	0,46458	493	0,52571	543	0,59007	593	0,65828
444	0,46578	494	0,52696	544	0,59140	594	0,65969
445	0,46697	495	0,52822	545	0,59272	595	0,66110
446	0,46817	496	0,52947	546	0,59405	596	0,66251
447	0,46937	497	0,53073	547	0,59538	597	0,66393
448	0,47056	498	0,53199	548	0,59671	598	0,66534
449	0,47176	499	0,53325	549	0,59804	599	0,66676
450	0,47296	500	0,53451	550	0,59938	600	0,66818

Winkelfunktionen Strich

	tan		tan		tan		tan
601	0,66960	651	0,74317	701	0,82232	751	0,90814
602	0,67102	652	0,74470	702	0,82397	752	0,90993
603	0,67245	653	0,74623	703	0,82562	753	0,91173
604	0,67387	654	0,74776	704	0,82727	754	0,91353
605	0,67530	655	0,74929	705	0,82893	755	0,91533
606	0,67673	656	0,75082	706	0,83058	756	0,91713
607	0,67816	657	0,75236	707	0,83224	757	0,91894
608	0,67960	658	0,75390	708	0,83391	758	0,92076
609	0,68104	659	0,75544	709	0,83557	759	0,92257
610	0,68247	660	0,75698	710	0,83724	760	0,92439
611	0,68391	661	0,75853	711	0,83891	761	0,92621
612	0,68536	662	0,76007	712	0,84059	762	0,92804
613	0,68680	663	0,76162	713	0,84226	763	0,92987
614	0,68824	664	0,76318	714	0,84394	764	0,93170
615	0,68969	665	0,76473	715	0,84563	765	0,93353
616	0,69114	666	0,76629	716	0,84731	766	0,93537
617	0,69259	667	0,76785	717	0,84900	767	0,93722
618	0,69405	668	0,76941	718	0,85069	768	0,93906
619	0,69550	669	0,77097	719	0,85238	769	0,94091
620	0,69696	670	0,77254	720	0,85408	770	0,94276
621	0,69842	671	0,77411	721	0,85578	771	0,94462
622	0,69988	672	0,77568	722	0,85748	772	0,94648
623	0,70135	673	0,77725	723	0,85919	773	0,94834
624	0,70281	674	0,77883	724	0,86089	774	0,95021
625	0,70428	675	0,78041	725	0,86261	775	0,95208
626	0,70575	676	0,78199	726	0,86432	776	0,95395
627	0,70722	677	0,78357	727	0,86604	777	0,95583
628	0,70869	678	0,78516	728	0,86776	778	0,95771
629	0,71017	679	0,78675	729	0,86948	779	0,95959
630	0,71165	680	0,78834	730	0,87120	780	0,96148
631	0,71313	681	0,78993	731	0,87293	781	0,96337
632	0,71461	682	0,79152	732	0,87466	782	0,96527
633	0,71609	683	0,79312	733	0,87640	783	0,96716
634	0,71758	684	0,79472	734	0,87813	784	0,96907
635	0,71907	685	0,79633	735	0,87987	785	0,97097
636	0,72056	686	0,79793	736	0,88162	786	0,97288
637	0,72205	687	0,79954	737	0,88336	787	0,97479
638	0,72355	688	0,80115	738	0,88511	788	0,97671
639	0,72504	689	0,80276	739	0,88687	789	0,97863
640	0,72654	690	0,80438	740	0,88862	790	0,98055
641	0,72804	691	0,80600	741	0,89038	791	0,98248
642	0,72955	692	0,80762	742	0,89214	792	0,98441
643	0,73105	693	0,80924	743	0,89391	793	0,98635
644	0,73256	694	0,81087	744	0,89567	794	0,98829
645	0,73407	695	0,81250	745	0,89745	795	0,99023
646	0,73558	696	0,81413	746	0,89922	796	0,99218
647	0,73709	697	0,81576	747	0,90100	797	0,99413
648	0,73861	698	0,81740	748	0,90278	798	0,99608
649	0,74013	699	0,81904	749	0,90456	799	0,99804
650	0,74165	700	0,82068	750	0,90635	800	1,00000

15.1.3. **Logarithmen**

z = Basis der Logarithmen
ln z = natürliche Logarithmen zu z
lg z = dekadische (Briggssche) Logarithmen zu z

Verwandlung der dekadischen Logarithmen in natürliche und umgekehrt

ln z = ln 10 · lg z Vielfache von ln 10 = 2,302585				lg z = lg e · ln z Vielfache von lg e = 0,434294			
1	2,302 585	6	13,815 511	1	0,434 294	6	2,605 767
2	4,605 170	7	16,118 096	2	0,868 589	7	3,040 061
3	6,907 755	8	18,420 681	3	1,302 883	8	3,474 356
4	9,210 340	9	20,723 266	4	1,737 178	9	3,908 650
5	11,512 925	10	23,025 851	5	2,171 472	10	4,342 945

Dekadische (Briggssche) Logarithmen der Zahlen 1 bis 100

z	lg z	z	lg z	z	lg z	z	lg z
1	0,00 000	26	1,41 497	51	1,70 757	76	1,88 081
2	0,30 103	27	1,43 136	52	1,71 600	77	1,88 649
3	0,47 712	28	1,44 716	53	1,72 428	78	1,89 209
4	0,60 206	29	1,46 240	54	1,73 239	79	1,89 763
5	0,69 897	30	1,47 712	55	1,74 036	80	1,90 309
6	0,77 815	31	1,49 136	56	1,74 819	81	1,90 849
7	0,84 510	32	1,50 515	57	1,75 587	82	1,91 381
8	0,90 309	33	1,51 851	58	1,76 343	83	1,91 908
9	0,95 424	34	1,53 148	59	1,77 085	84	1,92 428
10	1,00 000	35	1,54 407	60	1,77 815	85	1,92 942
11	1,04 139	36	1,55 630	61	1,78 533	86	1,93 450
12	1,07 918	37	1,56 820	62	1,79 239	87	1,93 952
13	1,11 394	38	1,57 978	63	1,79 934	88	1,94 448
14	1,14 613	39	1,59 106	64	1,80 618	89	1,94 939
15	1,17 609	40	1,60 206	65	1,81 291	90	1,95 424
16	1,20 412	41	1,61 278	66	1,81 954	91	1,95 904
17	1,23 045	42	1,62 325	67	1,82 607	92	1,96 379
18	1,25 527	43	1,63 347	68	1,83 251	93	1,96 848
19	1,27 875	44	1,64 345	69	1,83 885	94	1,97 313
20	1,30 103	45	1,65 321	70	1,84 510	95	1,97 772
21	1,32 222	46	1,66 276	71	1,85 126	96	1,98 227
22	1,34 242	47	1,67 210	72	1,85 733	97	1,98 677
23	1,36 173	48	1,68 124	73	1,86 332	98	1,99 123
24	1,38 021	49	1,69 020	74	1,86 923	99	1,99 564
25	1,39 794	50	1,69 897	75	1,87 506	100	2,00 000

Natürliche Logarithmen der Zahlen 1 bis 100

z	ln z	z	ln z	z	ln z	z	ln z
1	0,00000	26	3,25810	51	3,93183	76	4,33073
2	0,69315	27	3,29584	52	3,95124	77	4,34381
3	1,09861	28	3,33220	53	3,97029	78	4,35671
4	1,38629	29	3,36730	54	3,98898	79	4,36945
5	1,60944	30	3,40120	55	4,00733	80	4,38203
6	1,79176	31	3,43399	56	4,02535	81	4,39445
7	1,94591	32	3,46574	57	4,04305	82	4,40672
8	2,07944	33	3,49651	58	4,06044	83	4,41884
9	2,19722	34	3,52636	59	4,07754	84	4,43082
10	2,30258	35	3,55535	60	4,09434	85	4,44265
11	2,39789	36	3,58352	61	4,11087	86	4,45435
12	2,48491	37	3,61092	62	4,12713	87	4,46591
13	2,56495	38	3,63759	63	4,14313	88	4,47734
14	2,63906	39	3,66356	64	4,15888	89	4,48864
15	2,70805	40	3,68888	65	4,17439	90	4,49981
16	2,77259	41	3,71357	66	4,18965	91	4,51086
17	2,83321	42	3,73767	67	4,20469	92	4,52179
18	2,89037	43	3,76120	68	4,21951	93	4,53260
19	2,94444	44	3,78419	69	4,23411	94	4,54329
20	2,99573	45	3,80666	70	4,24850	95	4,55388
21	3,04452	46	3,82864	71	4,26268	96	4,56435
22	3,09104	47	3,85015	72	4,27667	97	4,57471
23	3,13549	48	3,87120	73	4,29046	98	4,58497
24	3,17805	49	3,89182	74	4,30406	99	4,59512
25	3,21888	50	3,91202	75	4,31749	100	4,60517

15.1.4. Exponentialfunktion

Exponentialfunktion und reziproke Exponentialfunktion der Zahlen 0 bis 10

x	e^x	e^{-x}	x	e^x	e^{-x}
0,05	1,0513	0,9512	2,55	12,8071	0,0781
0,10	1,1052	0,9048	2,60	13,4637	0,0743
0,15	1,1618	0,8607	2,65	14,1540	0,0707
0,20	1,2214	0,8187	2,70	14,8797	0,0672
0,25	1,2840	0,7788	2,75	15,6426	0,0639
0,30	1,3499	0,7408	2,80	16,4446	0,0608
0,35	1,4191	0,7047	2,85	17,2878	0,0578
0,40	1,4918	0,6703	2,90	18,1741	0,0550
0,45	1,5683	0,6376	2,95	19,1059	0,0523
0,50	1,6487	0,6065	3,00	20,0855	0,0498
0,55	1,7333	0,5769	3,05	21,1153	0,0474
0,60	1,8221	0,5488	3,10	22,1979	0,0450
0,65	1,9155	0,5220	3,15	23,3361	0,0429
0,70	2,0138	0,4966	3,20	24,5325	0,0408
0,75	2,1170	0,4724	3,25	25,7903	0,0388
0,80	2,2255	0,4493	3,30	27,1126	0,0369
0,85	2,3396	0,4274	3,35	28,5027	0,0351
0,90	2,4596	0,4066	3,40	29,9641	0,0334
0,95	2,5857	0,3867	3,45	31,5004	0,0317
1,00	2,7183	0,3679	3,50	33,1154	0,0302
1,05	2,8577	0,3499	3,55	34,8133	0,0287
1,10	3,0042	0,3329	3,60	36,5982	0,0273
1,15	3,1582	0,3166	3,65	38,4746	0,0260
1,20	3,3201	0,3012	3,70	40,4473	0,0247
1,25	3,4903	0,2865	3,75	42,5211	0,0235
1,30	3,6693	0,2725	3,80	44,7012	0,0224
1,35	3,8574	0,2592	3,85	46,9930	0,0213
1,40	4,0552	0,2466	3,90	49,4024	0,0202
1,45	4,2631	0,2346	3,95	51,9353	0,0193
1,50	4,4817	0,2231	4,00	54,5981	0,0183
1,55	4,7115	0,2122	4,05	57,3974	0,0174
1,60	4,9530	0,2019	4,10	60,3402	0,0166
1,65	5,2070	0,1920	4,15	63,4340	0,0158
1,70	5,4739	0,1827	4,20	66,6862	0,0150
1,75	5,7546	0,1738	4,25	70,1053	0,0143
1,80	6,0496	0,1653	4,30	73,6997	0,0136
1,85	6,3598	0,1572	4,35	77,4784	0,0129
1,90	6,6859	0,1496	4,40	81,4508	0,0123
1,95	7,0287	0,1423	4,45	85,6268	0,0117
2,00	7,3891	0,1353	4,50	90,0170	0,0111
2,05	7,7679	0,1287	4,55	94,6323	0,0106
2,10	8,1662	0,1225	4,60	99,4843	0,0101
2,15	8,5849	0,1165	4,65	104,5849	0,0096
2,20	9,0250	0,1108	4,70	109,9470	0,0091
2,25	9,4877	0,1054	4,75	115,5842	0,0087
2,30	9,9742	0,1003	4,80	121,5103	0,0082
2,35	10,4856	0,0954	4,85	127,7403	0,0078
2,40	11,0232	0,0907	4,90	134,2897	0,0074
2,45	11,5883	0,0863	4,95	141,1748	0,0071
2,50	12,1825	0,0821	5,00	148,4130	0,0067

Exponentialfunktion und reziproke Exponentialfunktion der Zahlen 0 bis 10. Fortsetzung von Seite 647

x	e^x	e^{-x}	x	e^x	e^{-x}
5,05	156,0223	0,0064	7,55	1900,7412	0,0005
5,10	164,0218	0,0061	7,60	1998,1946	0,0005
5,15	172,4314	0,0058	7,65	2100,6426	0,0005
5,20	181,2720	0,0055	7,70	2208,3452	0,0005
5,25	190,5661	0,0052	7,75	2321,5698	0,0004
5,30	200,3366	0,0050	7,80	2440,6001	0,0004
5,35	210,6082	0,0047	7,85	2565,7324	0,0004
5,40	221,4063	0,0045	7,90	2697,2783	0,0004
5,45	232,7579	0,0043	7,95	2835,5713	0,0004
5,50	244,6917	0,0041	8,00	2980,9551	0,0003
5,55	257,2373	0,0039	8,05	3133,7925	0,0003
5,60	270,4262	0,0037	8,10	3294,4629	0,0003
5,65	284,2913	0,0035	8,15	3463,3711	0,0003
5,70	298,8670	0,0033	8,20	3640,9458	0,0003
5,75	314,1903	0,0032	9,25	3827,6182	0,0003
5,80	330,2993	0,0030	8,30	4023,8691	0,0002
5,85	347,2341	0,0029	8,35	4230,1738	0,0002
5,90	365,0373	0,0027	8,40	4447,0557	0,0002
5,95	383,7529	0,0026	8,45	4675,0674	0,0002
6,00	403,4284	0,0025	8,50	4914,7588	0,0002
6,05	424,1127	0,0024	8,55	5166,7500	0,0002
6,10	445,8575	0,0022	8,60	5431,6504	0,0002
6,15	468,7172	0,0021	8,65	5710,1328	0,0002
6,20	492,7485	0,0020	8,70	6002,9053	0,0002
6,25	518,0123	0,0019	8,75	6310,6758	0,0002
6,30	544,5714	0,0018	8,80	6634,2383	0,0002
6,35	572,4923	0,0017	8,85	6974,3779	0,0001
6,40	601,8447	0,0017	8,90	7331,9561	0,0001
6,45	632,7015	0,0016	8,95	7707,8828	0,0001
6,50	665,1410	0,0015	9,00	8103,0684	0,0001
6,55	699,2435	0,0014	9,05	8518,5312	0,0001
6,60	735,0947	0,0014	9,10	8955,2773	0,0001
6,65	772,7832	0,0013	9,15	9414,4180	0,0001
6,70	812,4048	0,0012	9,20	9897,1172	0,0001
6,75	854,0579	0,0012	9,25	10404,5449	0,0001
6,80	897,8466	0,0011	9,30	10938,0098	0,0001
6,85	943,8802	0,0011	9,35	11498,8047	0,0001
6,90	992,2733	0,0010	9,40	12088,3516	0,0001
6,95	1043,1484	0,0010	9,45	12708,1504	0,0001
7,00	1096,6321	0,0009	9,50	13359,7012	0,0001
7,05	1152,8577	0,0009	9,55	14044,6836	0,0001
7,10	1211,9663	0,0008	9,60	14764,7578	0,0001
7,15	1274,1042	0,0008	9,65	15521,7520	0,0001
7,20	1339,4292	0,0007	9,70	16317,5879	0,0001
7,25	1408,1033	0,0007	9,75	17154,1953	0,0001
7,30	1480,2986	0,0007	9,80	18033,7305	0,0001
7,35	1556,1956	0,0006	9,85	18958,3242	0,0001
7,40	1635,9822	0,0006	9,90	19930,3242	0,0001
7,45	1719,8611	0,0006	9,95	20952,1953	0,0000
7,50	1808,0405	0,0006	10,00	22026,4219	0,0000

15.1.5. Die reziproken Werte der Zahlen 1 bis 100

n	1/n	n	1/n	n	1/n	n	1/n
1	1,00000	26	0,03846	51	0,01961	76	0,01316
2	0,50000	27	0,03704	52	0,01923	77	0,01299
3	0,33333	28	0,03571	53	0,01887	78	0,01282
4	0,25000	29	0,03448	54	0,01852	79	0,01266
5	0,20000	30	0,03333	55	0,01818	80	0,01250
6	0,16667	31	0,03226	56	0,01786	81	0,01235
7	0,14286	32	0,03125	57	0,01754	82	0,01220
8	0,12500	33	0,03030	58	0,01724	83	0,01205
9	0,11111	34	0,02941	59	0,01695	84	0,01190
10	0,10000	35	0,02857	60	0,01667	85	0,01176
11	0,09091	36	0,02778	61	0,01639	86	0,01163
12	0,08333	37	0,02703	62	0,01613	87	0,01149
13	0,07692	38	0,02632	63	0,01587	88	0,01136
14	0,07143	39	0,02564	64	0,01562	89	0,01124
15	0,06667	40	0,02500	65	0,01538	90	0,01111
16	0,06250	41	0,02439	66	0,01515	91	0,01099
17	0,05882	42	0,02381	67	0,01493	92	0,01087
18	0,05556	43	0,02326	68	0,01471	93	0,01075
19	0,05263	44	0,02273	69	0,01449	94	0,01064
20	0,05000	45	0,02222	70	0,01429	95	0,01053
21	0,04762	46	0,02174	71	0,01408	96	0,01042
22	0,04545	47	0,02128	72	0,01389	97	0,01031
23	0,04348	48	0,02083	73	0,01370	98	0,01020
24	0,04167	49	0,02041	74	0,01351	99	0,01010
25	0,04000	50	0,02000	75	0,01333	100	0,01000

15.1.6. Die ersten 8 Potenzen der Zahlen 1 bis 20

n	n^2	n^3	n^4	n^5	n^6	n^7	n^8
1	1	1	1	1	1	1	1
2	4	8	16	32	64	128	256
3	9	27	81	243	729	2 187	6 561
4	16	64	256	1 024	4 096	16 384	65 536
5	25	125	625	3 125	15 625	78 125	390 625
6	36	216	1 296	7 776	46 656	279 936	1 679 616
7	49	343	2 401	16 807	117 649	823 543	5 764 801
8	64	512	4 096	32 768	262 144	2 097 152	16 777 216
9	81	729	6 561	59 049	531 441	4 782 969	43 046 721
10	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000	10 000 000	100 000 000
11	121	1 331	14 641	161 051	1 771 561	19 487 171	214 358 881
12	144	1 728	20 736	248 832	2 985 984	35 831 808	429 981 696
13	169	2 197	28 561	371 293	4 826 809	62 748 517	815 730 721
14	196	2 744	38 416	537 824	7 529 536	105 413 504	1 475 789 056
15	225	3 375	50 625	759 375	11 390 625	170 859 375	2 562 890 625
16	256	4 096	65 536	1 048 576	16 777 216	268 435 456	4 294 967 296
17	289	4 913	83 521	1 419 857	24 137 569	410 338 673	6 975 757 441
18	324	5 832	104 976	1 889 568	34 012 224	612 220 032	11 019 960 576
19	361	6 859	130 321	2 476 099	47 045 881	893 871 739	16 983 563 041
20	400	8 000	160 000	3 200 000	64 000 000	1 280 000 000	25 600 000 000

15.2. Größen und Einheiten, Einheitensysteme

Physikalische Größen sind meßbare Eigenschaften der Materie sowie von Vorgängen und Zuständen in Raum und Zeit (z. B. die Temperatur einer Wassermenge oder die Geschwindigkeit eines Geschosses). Wenn man von dem Wert der Größe absieht und nur ihre Qualität kennzeichnen will, spricht man von *Größenart* oder *Dimension* (z. B. Länge, Stromstärke). Die *Einheit einer Größe* ist eine willkürlich, aber eindeutig festgelegte Größe derselben Größenart (Dimension). Jede Größe läßt sich als Vielfaches ihrer Einheit darstellen nach der Beziehung

$$\text{Physikalische Größe} = \text{Zahlenwert} \cdot \text{Einheit}. \qquad (1)$$

Physikalische Größen müssen ihrem Wesen nach grundsätzlich durch ein *Meßverfahren* definiert werden; reine *Wortdefinitionen* genügen nicht, sie sind physikalisch sinnlos. Es zeigt sich jedoch, daß man nicht alle, sondern nur einige wenige Größen, sog. *Basisgrößen*, direkt auf diese Weise definieren muß. Alle anderen Größen kann man mit Hilfe mathematischer Gleichungen aus den Basisgrößen ableiten; eine *abgeleitete Größe* wird also durch eine mathematische Gleichung definiert.

Wenn man nach Festlegung der Grundeinheiten (Basiseinheiten) die abgeleiteten Einheiten durch Einheitengleichungen, die nur den Zahlenfaktor 1 enthalten, definiert, erhält man ein abgestimmtes oder *kohärentes* Einheitensystem, das für das praktische Rechnen vorteilhaft ist. Es erweist sich überdies als zweckmäßig, *dezimale Vielfache*, beispielsweise das 10^3- oder 10^{-2}fache, der ursprünglichen kohärenten Einheiten zu benutzen und durch *Vorsilben* zu bezeichnen, die als Kurzzeichen dem Einheitensymbol beigefügt werden, z. B.

$$10^{-2}\ \text{m} = 1\ \text{cm}.$$

Diese Vorsilben sind international vereinbart und genormt [3] (Tab. 1501).

Tabelle 1501. *Vorsilben und Zeichen für dezimale Vielfache und Teile von Einheiten.*

Vorsilbe	Zeichen	Zehnerpotenz	Vorsilbe	Zeichen	Zehnerpotenz
Tera-	T	10^{12}	Dezi-	d	10^{-1}
Giga-	G	10^{9}	Zenti-	c	10^{-2}
Mega-	M	10^{6}	Milli-	m	10^{-3}
Kilo-	k	10^{3}	Mikro-	μ	10^{-6}
Hekto-	h	10^{2}	Nano-	n	10^{-9}
Deka-	da	10^{1}	Piko-	p	10^{-12}
			Femto-	f	10^{-15}
			Atto-	a	10^{-18}

15.2.1. Das Internationale Einheitensystem

Das Internationale Einheitensystem (Système International d'Unités) wurde 1954 von der 10. Generalkonferenz für Maß und Gewicht zur allgemeinen Benutzung in Wissenschaft und Technik empfohlen und auf der 11. Generalkonferenz (1960) mit der international verbindlichen Abkürzung SI angenommen. Dieser Empfehlung schloß sich der Wissenschaftliche Beirat des VDI an. Das entsprechende Gesetz wurde 1970 verabschiedet (Abschnitt 15.2.3).

Das Internationale Einheitensystem geht auf Vorschläge von G. GIORGI [4] zurück, weshalb es auch als Giorgisches Einheitensystem bezeichnet wird. Nach den Anfangsbuchstaben der Grundeinheiten Meter, Kilogramm, Sekunde, Ampere, Kelvin und Candela[1]) nennt man es häufig auch MKS-, MKSA- oder MKSAKC-Einheitensystem. Das Internationale Einheitensystem ist ein durchgehend kohärentes Einheitensystem; es sind also keine Umrechnungsfaktoren nötig, wenn man von dezimalen Vielfachen und Teilen der Einheiten absieht.

15.2.2. Das Technische Einheitensystem

Das Technische Einheitensystem unterscheidet sich vom Internationalen Einheitensystem im wesentlichen nur durch die unterschiedliche Wahl einer Grundeinheit: Es wird für die Dimension Kraft eine Grundeinheit gewählt, nicht für die Dimension Masse, deren Einheit zur abgeleiteten Einheit wird. Das Technische und das Internationale Einheitensystem könnten daher gleichberechtigte Einheitensysteme sein. Es zeigt sich aber, daß praktische und grundsätzliche Schwierigkeiten auftauchen, wenn man ein Einheitensystem mit einer Kraft als Grundeinheit aufbaut.

Die Krafteinheit des Technischen Einheitensystem wird daher mit der Masseneinheit kg des Internationalen Einheitensystems durch die Gleichung

$$1\ \text{kp} = 1\ \text{kg} \cdot g_n = 9{,}80665\ \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} = 9{,}80665\ \text{N} \tag{2}$$

festgesetzt, wobei der Normwert der Fallbeschleunigung durch

$$g_n = 9{,}80665\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \tag{3}$$

festgelegt wurde. Damit sind die in der Elektrotechnik üblichen Einheiten zur Krafteinheit kp nicht kohärent.

---

1) Die Candela ist die Grundeinheit der Lichtstärke (Abschnitt 15.2.3).

15.2.3. Gesetz über Einheiten im Meßwesen

Durch das am 2. Juli 1969 veröffentlichte „Gesetz über Einheiten im Meßwesen" (Bundesgesetzblatt 1969, Teil I, Nr. 55) und die „Ausführungsverordnung" vom 26. Juni 1970 (Bundesgesetzblatt 1970, Teil I, Nr. 62) gilt in der Bundesrepublik Deutschland das Internationale Einheitensystem (SI = Systême International d'Unités) [3].

Die Basiseinheiten des SI-Systems sind

das Meter (m)	für die Basisgröße Länge,
das Kilogramm (kg)	für die Basisgröße Masse,
die Sekunde (s)	für die Basisgröße Zeit,
das Ampere (A)	für die Basisgröße elektrische Stromstärke,
das Kelvin (K)	für die Basisgröße Temperatur,
die Candela (cd)	für die Basisgröße Lichtstärke.

Tabelle 1502 enthält die wichtigsten abgeleiteten Einheiten des Internationalen Einheitensystems mit besonderer Benennung.

Tabelle 1502. *Abgeleitete Einheiten des Internationalen Einheitensystems mit besonderer Benennung.*

Größenart	Einheit	Definitionsgleichung
Kraft	Newton N	$1\ \text{N} = 1\ \text{kg m s}^{-2}$
Energie	Joule J	$1\ \text{J} = 1\ \text{N m} = 1\ \text{kg m}^2\text{s}^{-2}$
Leistung	Watt W	$1\ \text{W} = 1\ \text{J s}^{-1} = 1\ \text{kg m}^2\text{s}^{-3}$
Druck	Pascal Pa	$1\ \text{Pa} = 1\ \text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$

Besonderer Name für den zehnten Teil des Megapascal (MPa) ist das Bar (bar), also 1 bar = 10^5 Pa.

Das Gesetz und die Ausführungsverordnung sind am 5. Juli 1970 in Kraft getreten. Das bisher verwandte Technische Einheitensystem (m — kp — s) tritt außer Kraft[1]). Manche bisher in Deutschland übliche, jedoch nicht zu den SI-Einheiten passende Einheiten dürfen noch während einer Übergangszeit, die laut Ausführungsverordnung z. T. mit dem 31. Dezember 1974 abgelaufen, z. T. mit dem 31. Dezember 1977 begrenzt ist (Abschnitt 15.2.3.2), gebraucht werden. Diese Übergangszeit ist unter anderem deshalb erforderlich, weil zunächst eine Umstellung der in zahlreichen Normblättern, Tabellen und Vorschriften enthaltenen Werkstoffkennwerte erfolgen muß.

---

1) Eine Umrechnungstabelle für die meisten ballistisch interessanten Größen findet sich in Abschnitt 15.4.

15.2.3.1. Wichtige gesetzliche abgeleitete Einheiten

Temperatur
Das Zeichen Grad Kelvin (°K) ist nur noch bis zum 5.7.1975 zugelassen. Der besondere Name für das Kelvin bei der Angabe von Celsius-Temperaturen ist der Grad Celsius (°C).

Elektrizität und Magnetismus

Elektrische Spannung	Einheit Volt (V)
Elektrischer Widerstand	Einheit Ohm (Ω)
Elektrischer Leitwert	Einheit Siemens (S)
Elektrizitätsmenge	Einheit Coulomb (C)
Elektrische Kapazität	Einheit Farad (F)
Induktivität	Einheit Henry (H)
Elektrische Feldstärke	Einheit Volt/Meter (V/m)
Magnetische Feldstärke	Einheit Ampere/Meter (A/m)

Licht

Leuchtdichte	Einheit Candela/Quadratmeter (cd/m^2)
Lichtstrom	Einheit Lumen (lm)
Beleuchtungsstärke	Einheit Lux (lx)[1]

15.2.3.2. Übergangsvorschriften [2]

Bis zum 31. Dezember 1977 dürfen auch die folgenden abgeleiteten Einheiten verwendet werden:

für die Länge — das Ångström (Å), 1 Å = 10^{-10} m;

für die Kraft — das Pond (p), 1 p = $9{,}80665 \cdot 10^{-3}$ N [3];

für den Druck —
a) die technische Atmosphäre (at) als besonderer Name für das Kilopond durch Quadratzentimeter (kp/cm^2),
1 at = 98066,5 Pa;

b) die physikalische Atmosphäre (atm),
1 atm = 101325 Pa;

c) das Torr (Torr) als besonderer Name für den siebenhundertsechzigsten Teil der physikalischen Atmosphäre,

$$1 \text{ Torr} = \frac{101325}{760} \text{ Pa} = 133{,}322 \text{ Pa};$$

d) die konventionelle Millimeter-Quecksilbersäule (mmHg),
1 mm Hg = 133,322 Pa;

1) 1 lx = 1 lm/m^2.

2) Auszugsweise.

3) vgl. Gleichung (2).

für die Energie, Arbeit und Wärmemenge

a) das Erg (erg), 1 erg = 10^{-7} J;

b) die Kalorie (cal), 1 cal = 4,1868 J;

für die Leistung die Pferdestärke (PS), 1 PS = 735,49875 W.

15.2.4. Wichtige angelsächsische Einheiten

Die Umstellung auf das Internationale Einheitensystem wird in England seit 1970 vollzogen und soll bis 1975 abgeschlossen sein; seine Einführung ist auch in den USA vorgesehen.

Die englischen und amerikanischen Masseneinheiten weichen z.T. voneinander ab; sie werden daher oft durch Vorsetzen von Imp. (Imperial) und US (United States) unterschieden.

Die folgenden Tabellen enthalten die Beziehungen, die zwischen den wichtigsten in England und in den USA gebrauchten Einheiten und den Einheiten des Internationalen Einheitensystems bestehen; in Abschnitt 15.3.5 finden sich einige Umrechnungstabellen.

Längeneinheiten

Einheit	Deutsche Benennung	1 Einheit =	
inch (in.)	Zoll	10 lines	25,40 mm
foot, feet (ft.)	Fuß	12 in.	0,3048 m
yard (yd.)	Yard	3 ft.	0,9144 m
fathom (fath.)	Faden	2 yd.	1,829 m
rod (=pole)	Rute	5,5 yd.	5,029 m
(statute) mile	Landmeile	1760 yd.	1,609 km
nautical mile	Seemeile	2027 yd.	1,853 km

Flächeneinheiten

Einheit	Deutsche Benennung	1 Einheit =	
square inch (sq. in.)	Quadratzoll	—	6,452 cm^2
square foot (sq. ft.)	Quadratfuß	144 sq. in.	0,09290 m^2
square yard (sq. yd.)	Quadratyard	9 sq. ft.	0,8361 m^2
square rod (sq. rod)	Quadratrute	30,25 sq. yd.	25,29 m^2
acre	Acker	160 sq. rods	40,47 a
square mile	Quadrat-(Land-)meile	640 acres	2,589 km^2

Raumeinheiten

Einheit	Deutsche Benennung	1 Einheit =	
cubic inch (cu. in.)	Kubikzoll	–	16,39 cm^3
cubic foot (cu. ft.)	Kubikfuß	1728 cu. in.	28,32 dm^3
cubic yard (cu. yd.)	Kubikyard	27 cu. ft.	0,7646 m^3
register ton	Registertonne	100 cu. ft.	2,832 m^3

Masseneinheiten

Einheit	Deutsche Benennung	1 Einheit =	
ounze (oz.)	Unze	1/16 lb.	28,35 g
pound (lb.)	Engl. Pfund	16 oz.	0,4536 kg
Imp. hundredweight(cwt.)	Engl. Zentner	112 lb.	50,80 kg
US hundredweight (cwt.)	US-Zentner	100 lb.	45,36 kg
Imp. ton (long ton)	Tonne	20 Imp. cwt.	1016 kg
US ton (short ton)	Tonne	20 US cwt.	907,2 kg

Verschiedene Einheiten

Einheit	Deutsche Benennung	1 Einheit =	
pound (force)/ foot (lb./ft.)	Pfund/Fuß	–	14,59 N/m
pound (force)/ square inch (psi)	Pfund/Quadrat-zoll	–	0,06895 bar
pound (mass)/ cubic foot (lb./cu.ft.)	Pfund/ Kubikfuß	–	16,02 kg/m^3
foot pound (force) (ft. – lb.)	Fußpfund	–	1,3558 J
British Thermal Unit (BTU)	Engl. Wärme-einheit	–	1,055 kJ
horse power (HP)	Engl. Pferdestärke	550 ft.-lb./sc.	0,7457 kW
horse power hour (HPh)	Engl. Pferdestärke-stunde	–	0,7457 kWh

15.2.5. **Härtemaße** [5]

Härte ist ein Maß für den Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines anderen entgegensetzt.

Brinellhärte (DIN 50 351): Eine gehärtete Stahlkugel oder Hartmetallkugel vom Durchmesser D (10 oder 5 oder 2,5 mm) wird mit einer bestimmten Kraft F (in N) während einer Zeit t (in s) in den Stoff eingedrückt. Der Eindruckdurchmesser d (in mm) ist ein Maß für die Brinell-Härtezahl, die ohne Einheit angegeben wird:

$$HB = \frac{\text{Prüfkraft}}{\text{Eindruckoberfläche}} = \frac{0{,}102 \cdot 2\,F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Zahlenbeispiel

Kugel ϕ D in mm	Probenstärke in mm	Prüfkraft F in N für Stahl	Bronze u. Messing
10	über 10	29420	9800
5	6 bis 10	7355	2450
2,5	3 bis 6	1840	613

Zur Kennzeichnung der angewendeten Prüfbedingungen wird an das Kurzzeichen HB der Belastungsgrad 0,102 F/D^2 angefügt, z. B. HB30 für Belastung F = 294,2 D^2.

Zwischen Zugfestigkeit σ_B und Brinellhärte HB besteht bei unlegiertem und niedrig legiertem Stahl im geglühten oder vergüteten Zustand angenähert die Beziehung σ_B = 3,5 HB30 (N/mm^2).

Rockwellhärte (DIN 50 103): Ein Diamantkegel mit 120° Spitzenwinkel und 0,2 mm Spitzenhalbmesser (Rockwell A und C), bei weichen Stoffen eine gehärtete 1/16″-Stahlkugel (Rockwell B), wird mit 98 N Vorlast auf den Prüfkörper aufgesetzt und stetig steigernd belastet bis zu 980 N (Rockwell A) oder 590 N (Rockwell B) oder 1471 N (Rockwell C). Der bleibende Unterschied der Eindringtiefe bei Vorlast und bei Prüflast (Vorlast + Zusatzlast) nach Wiederentlastung auf die Vorlast ist ein Maß für die Rockwellhärtezahl; 0,002 mm Eindringtiefe ist eine Rockwelleinheit:

$$\text{HRA und HRC} = 100 - \frac{\text{Eindringtiefe}}{0{,}002}; \quad HRB = 130 - \frac{\text{Eindringtiefe}}{0{,}002}$$

Zur Kennzeichnung der angewendeten Prüfbedingungen wird, wenn die Belastung von 1471 N oder 98 N für Kegel bzw. 590 N für Kugel ab-

weicht, an das Kurzzeichen HRC oder HRA bzw. HRB die Prüflast angefügt. Vergleichbar sind nur Härtewerte, die mit gleicher Belastung und gleichem Eindringkörper gefunden sind.

Anwendung für fast alle metallischen Werkstoffe, außer ganz weichen; besonders geeignet für Massenprüfungen, da die Härtezahlen unmittelbar an der Skala des Prüfgerätes abgelesen werden können. Im Ausland sind auch noch 1/8"-, 1/4"- und 1/2"-Kugeln mit den gleichen Prüflasten in Anwendung.

Vickershärte (DIN 50 133): Eine vierseitige Diamantpyramide mit 136° Spitzenwinkel (= 22° Neigung jeder Seitenfläche) wird mit bestimmter Kraft F (zwischen 19,6 und 980 N) bis zum Gleichgewicht eingedrückt. Die Diagonale d (in mm) des quadratischen Eindrucks ist ein Maß für die Vickers-Härtezahl, die ohne Einheit angegeben wird:

$$HV = \frac{\text{Prüfkraft}}{\text{Eindruckoberfläche}} = \frac{0{,}102 \cdot 2\,F \cdot \cos 22^\circ}{d^2} = \frac{0{,}189\,F}{d^2}$$

Zur Kennzeichnung der angewendeten Prüfbedingungen kann an das Kurzzeichen HV die Belastung angefügt werden, z.B. HV30; Regellasten 98, 294 und 588 N. Die Vickers-Härtezahl ist unabhängig von der Belastung, da die Eindrücke einander stets geometrisch ähnlich sind.

Anwendung für alle metallischen, mineralischen und glasartigen Werkstoffe, besonders sehr kleine und dünne Proben. Einsatz- und Nitrierschichten; zuverlässige Härtewerte.

Knoophärte (USA): Ähnlich Vickers, Grundfläche der Diamantpyramide aber schmaler Rhombus; Spitzenwinkel der Pyramide längs 172,5°, quer 136°. Anwendbar für sehr weiche bis zu den härtesten Metallen und Nichtmetallen.

Mikrohärte: Vickers- oder Knoophärte mit kleinen Prüflasten (0,1 . . . 1000 g). Anwendbar für Kleinstteile, harte und spröde Stoffe, Gefügebestandteile.

Skleroskophärte (Rückprallhärte) nach Shore: Ein Stahlkörper (mit Diamant- oder Hartmetallspitze) fällt aus bestimmter Höhe in einer senkrechten Führung auf den zu prüfenden Stoff. Die Höhe des Rückpralls ist ein Maß für die Skleroskophärte. Ein Vergleich mit den Eindruckverfahren ist nur bedingt möglich.

Härte nach Mohs und Breithaupt: Die Härtestufen nach Mohs (Breithaupt) sind so gestuft, daß jeweils ein Stoff den vorhergehenden gerade noch ritzt: Talk 1 (1), Gips 2 (2), Glimmer (3), Kalkspat 3 (4), Flußspat 4 (5), Apatit 5 (6), Hornblende (7), Feldspat 6 (8), Quarz 7 (9), Topas 8 (10), Korund 9 (11), Diamant 10 (12).

Shorehärte von Gummi: Ein federbelasteter Stahlstift von 1,3 mm ϕ mit konischer, abgestumpfter Spitze (Shore-A und -C) bzw. mit konischer abgerundeter Spitze (Shore-D) wird in die Probe eingedrückt. Die Zusammendrückung der Feder, die bei Shore-A kleiner ist als bei Shore-C und -D, ist das Maß für die Härte. Shore-A für Weichgummi, Shore-C und -D für Hartgummi und ähnliche harte Stoffe.

In Bild 1501 werden einige wichtige Härtemaße verglichen.

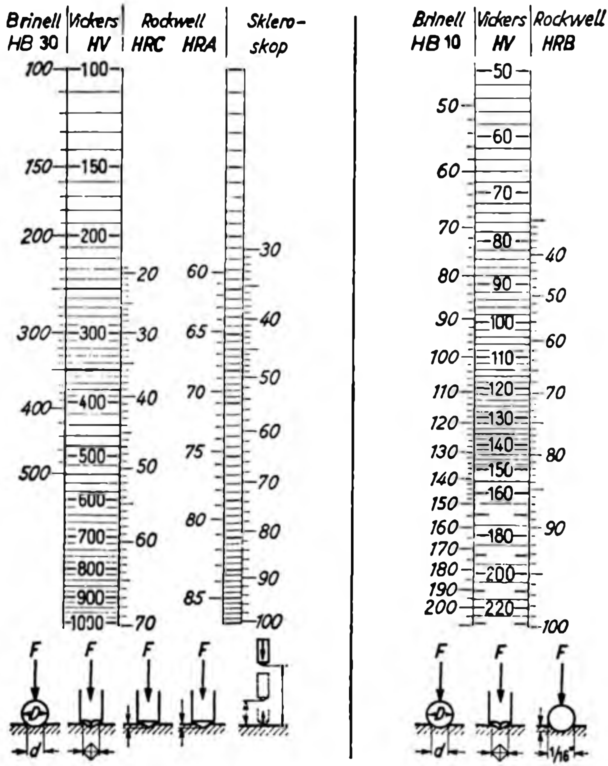


Bild 1501. *Härtemaße* [5].

15.3. Umrechnungstabellen

15.3.1. Energieeinheiten

	Nm, J, Ws	kWh	mkp	kcal	eV	BTU
Nm, J, Ws	1	$2,77778 \cdot 10^{-7}$	0,101972	$2,38846 \cdot 10^{-4}$	$6,24208 \cdot 10^{18}$	$9,47158 \cdot 10^{-4}$
kWh	$3,6 \cdot 10^{6}$	1	$3,67098 \cdot 10^{5}$	$8,59845 \cdot 10^{2}$	$2,24715 \cdot 10^{25}$	$3,40977 \cdot 10^{3}$
mkp	9,80665	$2,72407 \cdot 10^{-6}$	1	$2,34228 \cdot 10^{-3}$	$6,12139 \cdot 10^{19}$	$9.28841 \cdot 10^{-3}$
kcal	$4,1868 \cdot 10^{3}$	$1,163 \cdot 10^{-3}$	$4,26935 \cdot 10^{2}$	1	$2,61343 \cdot 10^{22}$	3,96556
eV	$1,60203 \cdot 10^{-19}$	$4,45008 \cdot 10^{-26}$	$1,63362 \cdot 10^{-20}$	$3.82638 \cdot 10^{-23}$	1	$1,51738 \cdot 10^{-22}$
BTU	$1,05579 \cdot 10^{3}$	$2,93275 \cdot 10^{-4}$	$1,07661 \cdot 10^{2}$	0,252171	$6,59033 \cdot 10^{21}$	1

15.3.2. Leistungseinheiten

	Nm/s, J/s, W	kW	mkp/s	kcal/h	PS	BTU/s
Nm/s, J/s, W	1	10^{-3}	0,101972	0.859845	$1,35962 \cdot 10^{-3}$	$9,47158 \cdot 10^{-4}$
kW	10^{3}	1	$1,01972 \cdot 10^{2}$	$8.59845 \cdot 10^{2}$	1,35962	0,947158
mkp/s	9,80665	$9,80665 \cdot 10^{-3}$	1	8,43220	$1,33333 \cdot 10^{-2}$	$9,28841 \cdot 10^{-3}$
kcal/h	1,163	$1,163 \cdot 10^{-3}$	0,118593	1	$1,58124 \cdot 10^{-3}$	$1,10154 \cdot 10^{-3}$
PS	$7,35499 \cdot 10^{2}$	0,735499	75	$6,32415 \cdot 10^{2}$	1	0,696633
BTU/s	$1,05579 \cdot 10^{3}$	1,05579	$1,07661 \cdot 10^{2}$	$9,07816 \cdot 10^{2}$	1,43547	1

15.3.3. Druckeinheiten

	N/m^2, Pa	bar	kp/cm^2 (at)	kp/m^2 (=mm WS)	Torr (=mm Hg)	atm
N/m^2, Pa	1	10^{-5}	$1,01972 \cdot 10^{-5}$	$1,01972 \cdot 10^{-1}$	$7,50062 \cdot 10^{-3}$	$9,86923 \cdot 10^{-6}$
bar	10^{5}	1	1,01972	$1,01972 \cdot 10^{4}$	$7,50062 \cdot 10^{2}$	0,986923
kp/cm^2 (at)	$9,80665 \cdot 10^{4}$	0,980665	1	10^{4}	$7,35559 \cdot 10^{2}$	0,967841
kp/m^2 (= mm WS)	9,80665	$9,80665 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}	1	$7,35559 \cdot 10^{-2}$	$9,67841 \cdot 10^{-5}$
Torr (=mm Hg)	$1,33322 \cdot 10^{2}$	$1,33322 \cdot 10^{-3}$	$1,35951 \cdot 10^{-3}$	13,5951	1	$1,31579 \cdot 10^{-3}$
atm	$1,01325 \cdot 10^{5}$	1,01325	1,03323	$1,03323 \cdot 10^{4}$	760,000	1

15.3.4. Temperaturgrade

C = Celsius; F = Fahrenheit

Umrechnung: $n°C = (9/5\,n + 32)°F$; $n°F = 5/9\,(n - 32)°C$

°C ← °F		°C → °F	°C ← °F		°C → °F	°C ← °F		°C → °F
−273,00	−459,4		−17,22	+ 1	+ 33,8	+ 43,33	+ 110	+ 230
−240,00	−400		−16,67	+ 2	+ 35,6	+ 48,89	+ 120	+ 248
−184,44	−300		−16,11	+ 3	+ 37,4	+ 54,44	+ 130	+ 266
−169,44	−273	−459,4	−15,56	+ 4	+ 39,2	+ 60,00	+ 140	+ 284
−156,67	−250	−418,0	−15,00	+ 5	+ 41,0	+ 65,56	+ 150	+ 302
−128,89	−200	−328,0	−14,44	+ 6	+ 42,8	+ 71,11	+ 160	+ 320
−101,10	−150	−238,0	−13,89	+ 7	+ 44,6	+ 76,67	+ 170	+ 338
			−13,33	+ 8	+ 46,4	+ 82,22	+ 180	+ 356
− 73,33	−100	−148,0	−12,78	+ 9	+ 48,2	+ 87,78	+ 190	+ 374
− 70,55	− 95	−139,0	−12,22	+ 10	+ 50,0	+ 93,33	+ 200	+ 392
− 67,77	− 90	−130,0	−11,67	+ 11	+ 51,8	+ 98,89	+ 210	+ 410
− 65,00	− 85	−121,0	−11,11	+ 12	+ 53,6	+ 104,44	+ 220	+ 428
− 62,22	− 80	−112,0	−10,56	+ 13	+ 55,4	+ 110,00	+ 230	+ 446
− 59,44	− 75	−103,0	−10,00	+ 14	+ 57,2	+ 115,56	+ 240	+ 464
− 56,66	− 70	− 94,0	− 9,44	+ 15	+ 59,0	+ 121,11	+ 250	+ 482
− 53,88	− 65	− 85,0	− 8,89	+ 16	+ 60,8	+ 126,67	+ 260	+ 500
− 51,11	− 60	− 76,0	− 8,33	+ 17	+ 62,6	+ 132,22	+ 270	+ 518
− 48,33	− 55	− 67,0	− 7,78	+ 18	+ 64,4	+ 137,78	+ 280	+ 536
− 42,77	− 45	− 49,0	− 6,67	+ 20	+ 68,0	+ 148,89	+ 300	+ 572
− 40,00	− 40	− 40,0	− 5,56	+ 22	+ 71,6	+ 176,67	+ 350	+ 662
− 37,22	− 35	− 31,0	− 4,44	+ 24	+ 75,2	+ 204,44	+ 400	+ 752
− 34,44	− 30	− 22,0	− 3,33	+ 26	+ 78,8	+ 232,22	+ 450	+ 842
− 31,66	− 25	− 13,0	− 2,22	+ 28	+ 82,4	+ 260,00	+ 500	+ 932
− 28,89	− 20	− 4,0	− 1,11	+ 30	+ 86,0	+ 287,78	+ 550	+1022
− 28,33	− 19	− 2,2	0	+ 32	+ 89,6	+ 315,56	+ 600	+1112
− 27,77	− 18	− 0,4	+ 1,11	+ 34	+ 93,2	+ 343,33	+ 650	+1202
− 27,22	− 17	+ 1,4	+ 2,22	+ 36	+ 96,8	+ 371,11	+ 700	+1292
− 26,66	− 16	+ 3,2	+ 3,33	+ 38	+100,4	+ 398,89	+ 750	+1382
− 26,11	− 15	+ 5,0	+ 4,44	+ 40	+104,0	+ 426,67	+ 800	+1472
− 25,55	− 14	+ 6,8	+ 5,56	+ 42	+107,6	+ 454,44	+ 850	+1562
− 25,00	− 13	+ 8,6	+ 6,67	+ 44	+111,2	+ 482,22	+ 900	+1652
− 24,44	− 12	+ 10,4	+ 7,78	+ 46	+114,8	+ 510,00	+ 950	+1742
− 23,89	− 11	+ 12,2	+ 8,89	+ 48	+118,4	+ 537,78	+1000	+1832
− 23,33	− 10	+ 14,0	+10,00	+ 50	+122,0	+ 593,33	+1100	+2012
− 22,78	− 9	+ 15,8	+12,78	+ 55	+131,0	+ 704,44	+1300	+2372
− 22,22	− 8	+ 17,6	+15,56	+ 60	+140,0	+ 815,56	+1500	+2732
− 21,66	− 7	+ 19,4	+18,33	+ 65	+149,0	+1093,33	+2000	+3632
− 21,11	− 6	+ 21,2	+21,11	+ 70	+158,0	+1371,11	+2500	+4532
− 20,55	− 5	+ 23,0	+23,89	+ 75	+167,0	+1648,89	+3000	+5432
− 20,00	− 4	+ 24,8	+26,67	+ 80	+176,0	+1926,67	+3500	+6332
− 19,44	− 3	+ 26,6	+29,44	+ 85	+185,0	+2204,41	+4000	+7232
− 18,89	− 2	+ 28,4	+32,22	+ 90	+194,0	+2482,22	+4500	+8132
− 18,33	− 1	+ 30,2	+35,00	+ 95	+203,0	+2760,00	+5000	+9032
− 17,78	0	+ 32,0	+37,78	+100	+212,0			

15.3.5. Angelsächsische Einheiten

Umwandlung angelsächsischer Einheiten in Internationale (metrische)

	sq.in. in cm^2	cu.in. in cm^3	ft. in m	yd. in m	sq.ft. in m^2	cu.ft. in m^3	lb. in kg	psi in bar
1	6,452	16,39	0,3048	0,9144	0,09290	0,02832	0,4536	0,06895
2	12,903	32,77	0,6096	1,8288	0,18581	0,05663	0,9072	0,1379
3	19,355	49,16	0,9144	2,7432	0,27871	0,08495	1,3608	0,2068
4	25,806	65,55	1,2192	3,6576	0,37161	0,11327	1,8144	0,2758
5	32,258	81,94	1,5240	4,5720	0,46452	0,14158	2,2680	0,3447
6	38,710	98,32	1,8288	5,4864	0,55742	0,16990	2,7216	0,4137
7	45,161	114,71	2,1336	6,4008	0,65032	0,19822	3,1751	0,4826
8	51,613	131,10	2,4384	7,3152	0,74322	0,22653	3,6287	0,5516
9	58,064	147,48	2,7432	8,2296	0,83613	0,25485	4,0823	0,6205

Umwandlung von Zoll in Millimeter

Zoll	—	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
—	—	3,18	6,35	9,52	12,70	15,88	19,05	22,22
1	25,40	28,58	31,75	34,92	38,10	41,28	44,45	47,62
2	50,80	53,98	57,15	60,32	63,50	66,68	69,85	73,02
3	76,20	79,38	82,55	85,72	88,90	92,08	95,25	98,42
4	101,60	104,78	107,95	111,12	114,30	117,48	120,65	123,82
5	127,00	130,18	133,35	136,52	139,70	142,88	146,05	149,22
6	152,40	155,58	158,75	161,92	165,10	168,28	171,45	174,62
7	177,80	180,98	184,15	187,32	190,50	193,68	196,85	200,02
8	203,20	206,38	209,55	212,72	215,90	219,08	222,25	225,42
9	228,60	231,78	234,95	238,12	241,30	244,48	247,65	250,82

Umwandlung von Millimeter in Zoll und umgekehrt

mm ← in.			mm ← in.			mm ← in.		
	mm → in.			mm → in.			mm → in.	
25,4	1	0,03937	889,0	35	1,37795	1727,2	68	2,67717
50,8	2	0,07874	914,4	36	1,41732	1752,6	69	2,71654
76,2	3	0,11811	939,8	37	1,45669	1778,0	70	2,75591
101,6	4	0,15748	965,2	38	1,49606	1803,4	71	2,79528
127,0	5	0,19685	990,6	39	1,53543	1828,8	72	2,83465
152,4	6	0,23622	1016,0	40	1,57480	1854,2	73	2,87402
177,8	7	0,27559	1041,4	41	1,61417	1879,6	74	2,91339
203,2	8	0,31496	1066,8	42	1,65354	1905,0	75	2,95276
228,6	9	0,35433	1092,2	43	1,69291	1930,4	76	2,99213
254,0	10	0,39370	1117,6	44	1,73228	1955,8	77	3,03150
279,4	11	0,43307	1143,0	45	1,77165	1981,2	78	3,07087
304,8	12	0,47244	1168,4	46	1,81102	2006,6	79	3,11024
330,2	13	0,51181	1193,8	47	1,85039	2032,0	80	3,14961
355,6	14	0,55118	1219,2	48	1,88976	2057,4	81	3,18898
381,0	15	0,59055	1244,6	49	1,92913	2082,8	82	3,22835
406,4	16	0,62992	1270,0	50	1,96850	2108,2	83	3,26772
431,8	17	0,66929	1295,4	51	2,00787	2133,6	84	3,30709
457,2	18	0,70866	1320,8	52	2,04724	2159,0	85	3,34646
482,6	19	0,74803	1346,2	53	2,08661	2184,4	86	3,38583
508,0	20	0,78740	1371,6	54	2,12598	2209,8	87	3,42520
533,4	21	0,82677	1397,0	55	2,16535	2235,2	88	3,46457
558,8	22	0,86614	1422,4	56	2,20472	2260,6	89	3,50394
584,2	23	0,90551	1447,8	57	2,24409	2286,0	90	3,54331
609,6	24	0,94488	1473,2	58	2,28346	2311,4	91	3,58268
635,0	25	0,98425	1498,6	59	2,32283	2336,8	92	3,62205
660,4	26	1,02362	1524,0	60	2,36220	2362,2	93	3,66142
685,3	27	1,06299	1549,4	61	2,40157	2387,6	94	3,70079
711,2	28	1,10236	1574,8	62	2,44094	2413,0	95	3,74016
736,6	29	1,14173	1600,2	63	2,48031	2438,4	96	3,77953
762,0	30	1,18110	1625,6	64	2,51969	2463,8	97	3,81890
787,4	31	1,22047	1651,0	65	2,55906	2489,2	98	3,85827
812,8	32	1,25984	1676,4	66	2,59843	2514,6	99	3,89764
838,2	33	1,29921	1701,8	67	2,63780	2540,0	100	3,93701
863,6	34	1,33858						

Umwandlung von Kilometer in Miles und umgekehrt

km ←	miles / km	→ miles	km ←	miles / km	→ miles	km ←	miles / km	→ miles
1,609	1	0,621	56,327	35	21,748	109,435	68	42,253
3,219	2	1,243	57,936	36	22,369	111,045	69	42,875
4,828	3	1,864	59,546	37	22,991	112,654	70	43,496
6,437	4	2,485	61,150	38	23,612	114,263	71	44,117
8,047	5	3,107	62,764	39	24,233	115,873	72	44,739
9,656	6	3,728	64,374	40	24,855	117,482	73	45,360
11,265	7	4,350	65,983	41	25,476	119,091	74	45,981
12,875	8	4,971	67,592	42	26,098	120,701	75	46,603
14,484	9	5,592	69,202	43	26,719	122,310	76	47,224
16,093	10	6,214	70,811	44	27,340	123,919	77	47,846
17,703	11	6,835	72,420	45	27,962	125,529	78	48,467
19,312	12	7,456	74,030	46	28,583	127,138	79	49,038
20,921	13	8,078	75,639	47	29,204	128,748	80	49,710
22,531	14	8,699	77,249	48	29,826	130,357	81	50,331
24,140	15	9,321	78,858	49	30,447	131,955	82	50,952
25,749	16	9,942	80,467	50	31,069	133,576	83	51,574
27,359	17	10,563	82,077	51	31,690	135,185	84	52,195
28,958	18	11,185	83,686	52	32,311	136,794	85	52,817
30,577	19	11,806	85,295	53	32,933	138,404	86	53,438
32,187	20	12,427	86,905	54	33,554	140,013	87	54,059
33,796	21	13,048	88,514	55	34,175	141,622	88	54,681
35,406	22	13,670	90,123	56	34,797	143,232	89	55,302
37,015	23	14,291	91,733	57	35,418	144,841	90	55,923
38,624	24	14,913	93,342	58	36,039	146,450	91	56,545
40,234	25	15,534	94,951	59	36,661	148,060	92	57,166
41,843	26	16,156	96,561	60	37,282	149,669	93	57,788
43,452	27	16,777	98,170	61	37,904	151,278	94	58,409
45,062	28	17,398	99,779	62	38,525	152,888	95	59,030
46,671	29	18,020	101,389	63	39,146	154,497	96	59,652
48,280	30	18,641	102,998	64	39,768	156,106	97	60,273
49,890	31	19,262	104,607	65	40,389	157,716	98	60,894
51,488	32	19,884	106,217	66	41,011	159,325	99	61,516
53,108	33	20,505	107,826	67	41,632	160,934	100	62,137
54,718	34	21,127						

Umwandlung von Kilogramm in Pounds und umgekehrt

kg ←	lb. / kg	→ lb.	kg ←	lb. / kg	→ lb.	kg ←	lb. / kg	→ lb.
0,454	1	2,205	15,876	35	77,162	30,844	68	149,914
0,907	2	2,409	16,329	36	79,366	31,298	69	152,119
1,361	3	6,614	16,738	37	81,571	31,751	70	154,324
1,814	4	8,818	17,237	38	83,776	32,205	71	156,528
2,268	5	11,023	17,690	39	85,980	32,659	72	158,733
2,722	6	13,228	18,144	40	88,185	33,112	73	160,937
3,175	7	15,432	18,597	41	90,390	33,566	74	163,142
3,629	8	17,637	19,051	42	92,945	34,919	75	165,347
4,082	9	19,842	19,504	43	94,799	34,473	76	167,551
4,536	10	22,046	19,958	44	97,003	34,927	77	169,756
4,990	11	24,251	20,412	45	99,208	35,380	78	171,961
5,443	12	26,455	20,865	46	101,413	35,834	79	174,165
5,897	13	28,660	21,319	47	103,617	36,287	80	176,370
6,350	14	30,865	21,772	48	105,822	36,741	81	178,574
6,804	15	33,069	22,226	49	108,026	37,195	82	180,779
7,257	16	35,274	22,680	50	110,231	37,648	83	182,984
7,711	17	37,479	23,133	51	112,436	38,102	84	185,188
8,165	18	39,683	23,587	52	114,640	38,555	85	187,393
8,618	19	41,888	24,040	53	116,845	39,009	86	189,598
9,072	20	44,092	24,494	54	119,050	39,463	87	191,802
9,525	21	46,297	24,948	55	121,254	39,316	88	194,007
9,979	22	48,502	25,401	56	123,459	40,370	89	196,211
10,433	23	50,706	25,855	57	125,663	40,823	90	198,416
10,886	24	52,911	26,308	58	127,868	41,277	91	200,621
11,340	25	55,116	26,762	59	130,073	41,731	92	202,825
11,793	26	57,320	27,216	60	132,277	42,184	93	205,030
12,247	27	59,525	27,669	61	134,482	42,638	94	207,235
12,701	28	61,729	28,123	62	136,687	43,091	95	209,439
13,154	29	63,934	28,576	63	138,891	43,545	96	211,644
13,608	30	66,139	29,030	64	141,096	43,999	97	213,848
14,061	31	68,343	29,484	65	143,300	44,452	98	216,053
14,515	32	70,548	29,937	66	145,505	44,906	99	218,258
14,969	33	72,753	30,391	67	147,710	45,359	100	220,462
15,422	34	74,957						

15.4. Begriffe und Symbole[1)] der inneren Ballistik

Dimensionen im Internationalen (mkgs) und im Technischen (mkps) Einheitensystem

Begriff	Symbol	Symbol für Rechenprogramme	Der Zahlenwert der Größe, gemessen in der Einheit des Techn. Maßsystems	ist zu multiplizieren mit	um den Zahlenwert der Größe in der Einheit des Internationalen Maßsystems zu erhalten
1. Begriffe u. Symbole					
1.1 Feste Größen					
Rohrkaliber	D	DR	m	1	m
Rohrquerschnittsfläche	A	AR	m^2	1	m^2
Volumen des Verbrennungsraumes	V_B	VB	m^3	1	m^3
Masse (allgemein)	m	M	$m^{-1}\,kp\,s^2$	$\{g\}$	kg
Trägheitsmoment	J	J	$mkps^2$	$\{g\}$	$m^2\,kg$
1.2. Variable Größen					
Zeit	t	T	s	1	s
Ortskoordinate (allgemein)	x	X	m	1	m
Volumen (allgemein)	V	V	m^3	1	m^3
Geschwindigkeit des Geschosses	v	UP	ms^{-1}	1	ms^{-1}
Geschwindigkeit der Treibladungsgase	u	UG	ms^{-1}	1	ms^{-1}
Gasdruck	p	P	$m^{-2}kp$	$\{g\}$	$m^{-1}kgs^{-2}$
Gasdichte	ρ	DG	$m^{-4}kps^2$	$\{g\}$	$m^{-3}kg$
Gastemperatur	T	TG	K	1	K
Schallgeschwindigkeit	a	US	ms^{-1}	1	ms^{-1}
1.3. Pulver- u. Verbrennungsdaten					
gesamte einseitige Schichtdicke des Pulvers	e_b	EB	m	1	m
Pulverwandstärke (web size)	$w = 2e_b$	W	m	1	m
einseitig abgebrannte Pulverschicht	e	E	m	1	m
Pulvervolumen (variabel)	V_C	VC	m^3	1	m^3
Oberfläche d. festen Pulvers	S	S	m^2	1	m^2
Anfangsoberfläche d. Pulvers	S_a	SA	m^2	1	m^2
Anteil der verbrannten Treibladungsmasse	z	Z	1	1	1
damit abgebrannte Treibladungsmasse	$z \cdot m_C$	Z*MC	$m^{-1}kps^2$	$\{g\}$	kg
Dichte d. unverbrannten Treibladung	ρ_C	DC	$m^{-4}kps^2$	$\{g\}$	$m^{-3}kg$
Pulvertemperatur	T_C	TC	K	1	K
Wärmemenge	Q	Q	mkp	$\{g\}$	m^2kgs^{-2}
spez. Explosionswärme[1)] (nach Vorschrift experimentell ermittelt)	Q_{ex}	QEX	m	$\{g\}$	m^2s^{-2}
Explosionstemperatur	T_{ex}	TEX	K	1	K
Pulverkonstante[1)] (f Wert)	f	F	m	$\{g\}$	m^2s^{-2}
Kovolumen d. Treibladungsgase[1)]	η	ETA	m^3kp^{-1}	1	m^3kg^{-1}
dynamische Lebhaftigkeit[2)]	L	LD	$m^2kp^{-1}s^{-1}$	$\{g\}^{-1}$	$mkg^{-1}s$
Abbrandkoeffizient[1)]	B_a	BA	s^{-1}	1	s^{-1}
lineare Verbrennungsgeschwindigkeit	$r = \frac{de}{dt}$	DE/DT	ms^{-1}	1	ms^{-1}
lineares Verbrennungsgesetz	$r = \beta p^{\alpha}$	BETA*P**ALP(HA)	m^{-1}	1	ms^{-1}
Formfunktion	$\varphi(z) = \frac{S}{S_a}$	PHI(Z)=S/SA	1	1	1

1) Symbole nach Richtlinien des Bundesministers der Verteidigung.

2) $\{g\} = 9{,}80665$

1.4. Verschiedenes					
Energie	E	EN	mkp	{g}	$m^2 kgs^{-2}$
spezifische Energie[1]	E_s	ENS	m	{g}	$m^2 s^{-2}$
Impuls[4]	I	I	kp s	{g}	$mkgs^{-1}$
spezifischer Impuls[1]	I_s	IS	s	{g}	$m\,s^{-1}$
spez. Wärme bei konst. Volumen[1]	c_v	CV	$m\,K^{-1}$	{g}	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
spez. Wärme bei konst. Druck[1]	c_p	CP	$m\,K^{-1}$	{g}	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
universelle Gaskonstante	$R_0 = 8314 \times \frac{m^2\,kg}{s^2\,kmol\,K}$	RØ[5]	$mkp\,kmol^{-1} K^{-1}$	{g}	$m^2 kgs^{-2} kmol^{-1} K^{-1}$
spezielle Gaskonstante[1]	$R = c_p - c_v = \frac{R_0}{M}$	R	$m\,K^{-1}$	{g}	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
Molmasse[1]	M	MM	$kpkmol^{-1}$	1	$kg\,kmol^{-1}$
Verhältnis d.spez.Wärmen (Adiabatenkoeffizient)	$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$	CP/CV = = KAP(PA)	1	1	1
Polytropen-Exponent (experimentell ermittelt)	γ	GAM(MA)	1	1	1
Mitführungsfaktor	ϵ	EPS	1	1	1
Falls erforderlich, können ferner verwendet werden:					
Ladedichte[1]	$\Delta = \frac{m_C}{V_B}$	DEL(TA)	$m^{-3} kp$	1	$m^{-3} kg$
Druck, gemessen mit Kupferstauchkörper	p_{Cu}	PCU	$m^{-2} kp$	{g}	$m^{-1} kgs^{-2}$
Pulverabmessungen					
Außendurchmesser	D_C	ADC	m	1	m
Innendurchmesser	d_C	IDC	m	1	m
Länge	l_C	LC	m	1	m
Breite	b_C	BC	m	1	m
Dicke	w	W	m	1	m

2. Indizes

C: kennzeichnet die Treibladung (Charge), z. B. m_C, ρ_C, T_C, ...
P: kennzeichnet das Geschoß (Projectile), z. B. m_P, p_P, ...
R: kennzeichnet das Rohr, z. B. m_R, v_R, ...
a: Werte vor Beginn der Verbrennung, z. B. V_a, S_a, ...
m: Werte bei Erreichen des Maximaldrucks, z. B. p_m, t_m, v_m[6]), ...
b: Werte am Ende der Verbrennung, z. B. V_b, v_b, p_b, t_b, ...
e: Werte zum Zeitpunkt des Durchgangs des Geschoßbodens durch die Mündung, z. B. V_e, v_e, t_e, ...

Weitere wichtige Zeitpunkte, wie z. B. Erreichen des Einpreßdrucks, Brennende eines Beiladungspulvers usw., werden fortlaufend mit den Indizes 1, 2, 3, ... gekennzeichnet.
Eine Reihenfolge wird nicht vorgeschrieben.

[1]) Im technischen Maßsystem auf kp bezogen, im physikalischen Maßsystem auf kg bezogen.

[2]) Die dynamische Lebhaftigkeit L ist definiert durch die Gleichung $\frac{dz}{dt} = L \cdot p$.
In der Druckbombe wird sie als $L = \dot{p}/(p \cdot p_m)$ gemessen. Mit der heute kaum noch verwendeten Lebhaftigkeit A^+ ist sie durch die Beziehung $L = A^+ \cdot \varphi(z) \cdot p^{\alpha - 1}$ verknüpft.

[3]) $\frac{dz}{dt} = B_a \cdot \varphi(z) \cdot (\frac{p}{p_0})^{\alpha}$; $p_0 = 1$ bar [6].

[4]) Das in DIN 1304 für den Impuls vorgesehene p soll allein für den Druck verwendet werden.

[5]) ϕ, damit von Buchstabe O zu unterscheiden.

[6]) Mittelwerte werden mit einem Querstrich über dem entsprechenden Symbol versehen, z. B. $\overline{p}$, wobei hinzuzufügen ist, welche Art von Mittelwertbildung betrachtet wird.

15.5. Verschiedenes

15.5.1. Chemische Elemente [5]

Atomgewichte bezogen auf den Wert 12 für die Atommasse des Kohlenstoffisotops ^{12}C
Abkürzungen: m = Metall; n = Nichtmetall; g = Gas.

Element	Zeichen	Art	Ordngs.-Zahl	Atomgewicht	Wertigkeit	Jahr d. Entdeckung	Entdecker
Actinium	Ac	m	89	227	3	1899	Debierne
Aluminium	Al	m	13	26,98	3	1827	Wöhler
Americium[5]	Am	m	95	243	3; 4; 5; 6	1945	Seaborg, Morgan
Antimon	Sb	m	51	121,75	3; 5	Altert.	
Argon	Ar	g	18	39,95	0	1894	Ramsay, Rayleigh
Arsen	As	n	33	74,92	3; 5	1649	Schröder
Astat	At	n	85	210	1; 3; 5; 7	1940	Karlik u. Bernert
Barium	Ba	m	56	137,34	2	1808	Davy
Berkellum[5]	Bk	m	97	245	3; 4	1950	Seaborg
Beryllium	Be	m	4	9,01	2	1827	Wöhler
Blei	Pb	m	82	207,19	2; 4	Altert.	
Bor	B	n	5	10,81	3	1808	Gay-Lussac, Thénard
Brom	Br	n	35	79,91	1; 5	1826	Balard
Cadmium	Cd	m	48	112,4	2	1818	Strohmeyer
Cäsium[3] [4]	Cs	m	55	132,9	1	1860	Bunsen, Kirchhoff
Calzium	Ca	m	20	40,08	2	1808	Davy
Californium[5]	Cf	m	98	246	—	1950	Seaborg
Cer	Ce	m	58	140,12	3; 4	1814	Berzelius
Chlor	Cl	g	17	35,45	1; 3; 5; 7	1774	Scheele
Chrom	Cr	m	24	52,00	2; 3; 6	1797	Vauquelin
Curium[5]	Cm	m	96	243	3; 4; 5; 6	1945	Seaborg u. James
Dysprosium	Dy	m	66	162,5	3	1886	Lecoq de Boisbaudran
Einsteinium[5]	Es		99	246		1955	Seaborg u.a.
Eisen	Fe	m	26	55,85	2; 3; 6	Altert.	
Erbium	Er	m	68	167,26	3	1843	Mosander
Europium	Eu	m	63	151,96	3	1892	Lecoq de Boisbaudran
Fermium[5]	Fm		100	250		1955	Seaborg u.a.
Fluor[3]	F	g	9	19,00	1	1887	Moissan
Francium	Fr	m	87	223	1	1939	Perey
Gadolinium	Gd	m	64	157,25	3	1880	Marignac
Gallium[4]	Ga	m	31	69,72	2; 3	1875	Lecoq de Boisbaudran
Germanium	Ge	m	32	72,59	2; 4	1886	Winkler
Gold	Au	m	79	196,97	1; 3	Altert.	
Hafnium	Hf	m	72	178,49	4	1923	Hevesy u. Coster
Helium[1] [2]	He	g	2	4,003	0	1894	Ramsay, Rayleigh
Holmium	Ho	m	67	164,93	3	1911	Holmberg
Indium	In	m	49	114,82	3	1863	Reich u. Richter
Iridium[3]	Ir	m	77	192,2	3; 4	1803	Tennant
Jod	J	m	53	126,9	1; 3; 5; 7	1811	Courtois
Kalium	K	m	19	39,10	1	1807	Davy
Kobalt	Co	m	27	58,93	2; 3	1735	Brandt
Kohlenstoff[2]	C	n	6	12,01	2; 4	Altert.	
Krypton	Kr	g	36	83,80	0	1898	Ramsay
Kupfer	Cu	m	29	63,54	1; 2	Altert.	

Lanthan	La	m	57	138,91	3	1839	Mosander
Lawrencium	Lw	m	103	257	—	1961	Lawrence u.a.
Lithium [1])	Li	m	3	6,94	1	1817	Arfvedson
Lutetium	Lu	m	71	174,97	3	1905	Auer v. Welsbach
Magnesium	Mg	m	12	24,31	2	1808	Davy
Mangan	Mn	m	25	54,94	2; 3; 4; 6; 7	1780	Gahn, Scheele
Mendelevium [5]	Md		101	256		1955	Seaborg
Molybdän	Mo	m	42	95,94	3; 4; 6	1782	Hjelm
Natrium	Na	m	11	22,99	1	1807	Davy
Neodym	Nd	m	60	144,24	3	1885	Auer v. Welsbach
Neon	Ne	g	10	20,18	0	1898	Ramsay, Travers
Neptunium [5]	Np	m	93	237	3; 4; 5; 6	1938	Fermi, Hahn, Millan
Nickel	Ni	m	28	58,71	2; 3	1751	Cronstedt, Bergmann
Niob	Nb	m	41	92,91	3; 5	1801	Hatchet
Nobelium [5]	No	m	102	254		1957	Schwed.u.engl.Gruppe
Osmium [1]	Os	m	76	190,2	2; 3; 4; 8	1803	Tennant
Palladium	Pd	m	46	106,4	2; 4	1803	Wollaston
Phosphor	P	n	15	30,97	3; 5	1669	Brandt
Platin	Pt	m	78	195,1	2; 4	1748	Ulloa
Plutonium [5]	Pu	m	94	242	3; 4; 5; 6	1940	Seaborg
Polonium	Po	m	84	210	6	1898	P. u. M. Curie
Praseodym	Pr	m	59	140,91	3	1885	Auer v. Welsbach
Promethium	Pm	m	61	145	3	1926	Hopkins, Yntema
Protactinium	Pa	m	91	231	5	1917	Hahn u. Meitner
Quecksilber [2]	Hg	m	80	200,59	1; 2	Altert.	
Radium	Ra	m	88	226,0	2	1898	Curie
Radon	Rn	g	86	222	0	1900	Dorn
Rhenium	Re	m	75	186,2	3; 4; 5; 6; 7	1925	Noddack
Rhodium	Rh	m	45	102,9	3	1803	Wollaston
Rubidium	Rb	m	37	85,47	1	1860	Bunsen, Kirchhoff
Ruthenium	Ru	m	44	101,07	4; 8	1848	Klaus
Samarium	Sm	m	62	150,35	3	1879	Lecoq de Boisbaudran
Sauerstoff	O	g	8	16,00	2	1774	Priestley, Scheele
Scandium	Sc	m	21	44,96	3	1879	Nilson
Schwefel	S	n	16	32,06	2; 4; 6	Altert.	
Selen	Se	n	34	78,96	2; 4; 6	1817	Berzelius
Silber	Ag	m	47	107,87	1; 2	Altert.	
Silicium	Si	n	14	28,09	4	1823	Berzelius
Stickstoff	N	g	7	14,01	2; 3; 5	1772	Scheele
Strontium	Sr	m	38	87,62	2	1808	Davy
Tantal	Ta	m	73	180,95	5	1802	Eckeberg
Technetium	Tc	m	43	99	7	1937	Perrier, Segrè, Wu
Tellur	Te	m	52	127,6	2; 4; 6	1789	Klaproth
Terbium	Tb	m	65	158,92	3	1842	Mosander
Thallium	Tl	m	81	204,37	1; 3	1861	Crookes
Thorium	Th	m	90	232,04	4	1828	Berzelius
Thulium	Tm	m	69	168,93	3	1879	Cleve
Titan	Ti	m	22	47,90	2; 3; 4	1791	Gregor
Uran	U	m	92	238,03	3; 4; 5; 6	1786	Klaproth
Vanadium	V	m	23	50,94	2; 3; 4; 5	1830	Sefström
Wasserstoff [1]	H	g	1	1,008	1	1766	Cavendish
Wismut	Bi	m	83	208,9	3; 5	1546	Agricola
Wolfram [2]	W	m	74	183,85	2; 3; 4; 5; 6	1785	d' Elhuyard
Xenon	X	g	54	131,3	0	1898	Ramsay
Ytterbium	Yb	m	70	173,04	3	1907	Auer v. Welsbach
Yttrium	Y	m	39	88,90	3	1843	Mosander
Zink	Zn	m	30	65,37	2	Altert.	
Zinn	Sn	m	50	118,69	2; 4	Altert.	
Zirkonium	Zr	m	40	91,22	4	1824	Berzelius

Anmerkungen 1 bis 5 zu „Chemische Elemente".

1) Wichte. Das leichteste Metall ist Lithium (ρ = 0,543 g/cm^3), das schwerste Osmium (ρ = 22,7 g/cm^3). Die leichtesten Gase sind Wasserstoff (ρ = 0,0899 kg/Nm^3) und Helium (ρ = 0,178 kg/Nm^3).
2) Schmelzpunkt. Den höchsten Schmelzpunkt aller Elemente hat Kohlenstoff mit 3500°C, den niedrigsten Helium mit −272°C. Den höchsten Schmelzpunkt der Metalle besitzt Wolfram mit 3370°C, den niedrigsten Quecksilber mit −38,9°C.
3) Reaktionsfähigkeit. Das chemisch reaktionsfähigste Element ist Fluor; praktisch reaktionsunfähig sind die Edelgase (Wertigkeit 0); sie gehen unter normalen Bedingungen keine chemischen Verbindungen ein. Das edelste Metall ist Iridium, das unedelste Cäsium.
4) Aggregatzustand. Bei Normaltemperatur (20°C) sind 11 Elemente gasförmig, 75 fest, Brom und Quecksilber flüssig; bei etwas höherer Temperatur schmelzen Cäsium (Schmelztemperatur 28,5°C) und Gallium (Schmelztemperatur 29,8°C).
5) Künstlich hergestellte Überelemente.

15.5.2. Griechisches Alphabet

Alpha	a	α A	Jota	i	ι I	Rho	r(h)	ρ P
Beta	b	β B	Kappa	k	κ K	Sigma	s	σ Σ
Gamma	g	γ Γ	Lambda	l	λ Λ	Tau	t	τ T
Delta	d	δ Δ	My	m	μ M	Ypsilon	y	υ Υ
Epsilon	e	ϵ E	Ny	n	ν N	Phi	ph	φ Φ
Zeta	z	ζ Z	Xi	x	ξ Ξ	Chi	ch	χ X
Eta	e	η H	Omikron	o	o O	Psi	ps	ψ Ψ
Theta	th	ϑ Θ	Pi	p	π Π	Omega	o	ω Ω

Literatur

[1] Stille, U.: Messen und Rechnen in der Physik. Braunschweig 1961.
[2] Baehr, H.D.: Thermodynamik. Berlin 1966.
[3] Deutscher Normenausschuß: DIN 1301, Einheiten. Berlin 1971.
[4] Giorgi, G.: Atti Ass. elettrot. Ital. 5 (1901), S. 402.
[5] Bosch: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Robert Bosch GmbH, Stuttgart 1966.
[6] Germershausen, R.; Witt, W.; Melchior, E.: Thermodynamisches Modell der Innenballistik. — I. Feste Treibstoffe, mit konstanter Oberfläche abbrennend. Wehrtechnik 3 (1971), S. 281.

Anmerkungen 1 bis 5 zu „Chemische Elemente".

1) Wichte. Das leichteste Metall ist Lithium (ρ = 0,543 g/cm³), das schwerste Osmium (ρ = 22,7 g/cm³). Die leichtesten Gase sind Wasserstoff (ρ = 0,0899 kg/Nm³) und Helium (ρ = 0,178 kg/Nm³).
2) Schmelzpunkt. Den höchsten Schmelzpunkt aller Elemente hat Kohlenstoff mit 3500 °C, den niedrigsten Helium mit −272 °C. Den höchsten Schmelzpunkt der Metalle besitzt Wolfram mit 3370 °C, den niedrigsten Quecksilber mit −38,9 °C.
3) Reaktionsfähigkeit. Das chemisch reaktionsfähigste Element ist Fluor; praktisch reaktionsunfähig sind die Edelgase (Wertigkeit 0); sie gehen unter normalen Bedingungen keine chemischen Verbindungen ein. Das edelste Metall ist Iridium, das unedelste Cäsium.
4) Aggregatzustand. Bei Normaltemperatur (20 °C) sind 11 Elemente gasförmig, 75 fest, Brom und Quecksilber flüssig; bei etwas höherer Temperatur schmelzen Cäsium (Schmelztemperatur 28,5 °C) und Gallium (Schmelztemperatur 29,8 °C).
5) Künstlich hergestellte Überelemente.

15.5.2. Griechisches Alphabet

Alpha	a	α A	Jota	i	ι I	Rho	r(h)	ρ P
Beta	b	β B	Kappa	k	κ K	Sigma	s	σ Σ
Gamma	g	γ Γ	Lambda	l	λ Λ	Tau	t	τ T
Delta	d	δ Δ	My	m	μ M	Ypsilon	y	υ Υ
Epsilon	e	ϵ E	Ny	n	ν N	Phi	ph	φ Φ
Zeta	z	ζ Z	Xi	x	ξ Ξ	Chi	ch	χ X
Eta	e	η H	Omikron	o	o O	Psi	ps	ψ Ψ
Theta	th	ϑ Θ	Pi	p	π Π	Omega	o	ω Ω

Literatur

[1] Stille, U.: Messen und Rechnen in der Physik. Braunschweig 1961.
[2] Baehr, H.D.: Thermodynamik. Berlin 1966.
[3] Deutscher Normenausschuß: DIN 1301, Einheiten. Berlin 1971.
[4] Giorgi, G.: Atti Ass. elettrot. Ital. 5 (1901), S. 402.
[5] Bosch: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Robert Bosch GmbH, Stuttgart 1966.
[6] Germershausen, R.; Witt, W.; Melchior, E.: Thermodynamisches Modell der Innenballistik. — I. Feste Treibstoffe, mit konstanter Oberfläche abbrennend. Wehrtechnik 3 (1971), S. 281.

Stichwortverzeichnis